УДК [577.27+579](083.4)(084.121)(075.8)
ББК 28.4я73-1+28.707.4я73-1+52.54я73-1+52.64я73-1
М42

*Регистрационный номер рецензии 517 от 06 июля 2009 г.
ФГУ Федеральный институт развития образования*

М42 **Медицинская микробиология, вирусология и иммунология**. В 2-х т. Том 1 : учеб. по дисциплине «Микробиология, вирусология и иммунология» для студентов учреждений высш. проф. образования, обучающихся по специальностям 060101.65 «Лечеб. дело», 060103.65 «Педиатрия», 060104.65 «Медико-профилакт. дело» / под ред. В. В. Зверева, М. Н. Бойченко. — М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010. — 448 с. : ил. + CD.

ISBN 978-5-9704-1418-7 (т.1)
ISBN 978-5-9704-1422-4 (общ.)

Издание подготовлено сотрудниками кафедр микробиологии, вирусологии и иммунологии Московской медицинской академии имени И.М. Сеченова, Российского государственного медицинского университета, Московского государственного медико-стоматологического университета, Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени И.П. Павлова, Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, Оренбургской государственной медицинской академии, Ростовского государственного медицинского университета, Омской государственной медицинской академии, Ставропольской государственной медицинской академии, Волгоградской государственной медицинской академии, Челябинской государственной медицинской академии.

Учебник состоит из двух томов (20 глав), в которых последовательно разбираются вопросы общей и частной микробиологии, вирусологии и иммунологии. Теоретический материал проиллюстрирован таблицами и рисунками.

Первый том состоит из 2-х частей, в которые входят 14 глав. Материал первой части (гл. 1—7) посвящен общей микробиологии. В ней описаны история микробиологии, классификация, морфология, физиология, экология и генетика микробов, противомикробные препараты. Во второй части (гл. 8—14) изложено учение об инфекции и иммунитете.

Издание дополнено компакт-диском. На компакт-диске представлены дополнения по основным главам учебника (гл. 8, 9, 15—17), а также материалы по санитарной микробиологии для студентов медико-профилактических факультетов медицинских вузов.

Учебник написан в соответствии с официально утвержденной программой преподавания и предназначен для студентов лечебного, педиатрического и медико-профилактических факультетов медицинских вузов.

УДК [577.27+579](083.4)(084.121)(075.8)
ББК 28.4я73-1+28.707.4я73-1+52.54я73-1+52.64я73-1



ISBN 978-5-9704-1418-7 (т.1)
ISBN 978-5-9704-1422-4 (общ.)

# АВТОРСКИЙ КОЛЛЕКТИВ

**Зверев В.В.,** акад. РАМН, д-р биол. наук, проф. зав. кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Бойченко М.Н.,** д-р биол. наук, проф. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Быков А.С.,** д-р мед. наук, проф. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Миронов А.Ю.,** д-р мед. наук, проф. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Несвижский Ю.В.**, д-р мед. наук, проф. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Пашков Е.П.,** д-р мед. наук, проф. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Петрова Л.И.,** канд. биол. наук, научный сотрудник НИИ биоорганических соединений им. Шемякина и Овчинникова РАН

**Буданова Е.В.**, канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Давыдова Н.В.**, канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Карсонова М.И.**, канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Нечаев Д.Н.,** канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Рыбакова А.М.**, канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Усатова Г.Н.**, канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Хорошко Н.В.,** канд. мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии ММА им. И.М. Сеченова

**Бухарин О.В.,** чл.-кор. РАН, акад. РАМН, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Оренбургской государственной медицинской академии

**Долгушин И.И.,** чл.-кор. РАМН, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Челябинской государственной медицинской академии

**Кафарская Л.И.,** д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии и вирусологии Российского государственного медицинского университета

**Крамарь В.С.**, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии, вирусологии, иммунологии с курсом клинической микробиологии Волгоградского государственного медицинского университета

**Москаленко Е.П.**, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Ростовского государственного медицинского университета

**Пожарская В.О.**, д-р мед. наук, проф., зав кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Ставропольской государственной медицинской академии

**Рудаков Н.В.**, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Омской государственной медицинской академии

**Сбойчаков В.Б.**, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова

**Тец В.В.**, д-р мед. наук, проф., зав кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. И.П. Павлова

**Усвяцов Б.Я.**, д-р мед. наук, проф. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии Оренбургской государственной медицинской академии

**Харсеева Г.Г.**, д-р мед. наук, доц. кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии Ростовского государственного медицинского университета

**Царев В.Н.**, д-р мед. наук, проф., зав. кафедрой микробиологии, вирусологии и иммунологии Московского государственного медико-стоматологического университета

# СОДЕРЖАНИЕ

## СОДЕРЖАНИЕ КОМПАКТ-ДИСКА

# ЧАСТЬ I

# ОБЩАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ

# Глава 1

# ВВЕДЕНИЕ В МИКРОБИОЛОГИЮ И ИММУНОЛОГИЮ

## 1.1. Предмет медицинская микробиология

Медицинскую микробиологию (от греч. *micros* — малый, *bios* — жизнь, *logos* — учение) можно определить как науку, которая изучает микробы во всем многообразии их отношений с организмом человека.

**Микробы** — это микроскопически малые живые существа, как правило, одноклеточные. Увидеть их можно только при помощи специальных приборов — микроскопов.

Микробы поистине вездесущи. Возникнув на нашей планете 3–4 млрд лет назад, т.е. задолго до появления растений и животных, они теперь являются самой многочисленной и разнообразной группой живых существ. Микробы можно обнаружить практически везде. Незримо микробы присутствуют в почве, воздухе, воде, пище, которую мы принимаем. Они населяют все экологические ниши, начиная ото льдов Антарктиды до гейзеров Камчатки, от соленых вод Мертвого моря до африканских пустынь, выдерживая высокую концентрацию соли и инсоляцию (облучение солнечными лучами). В самых глубоких впадинах на дне Тихого океана обнаружены микробы.

Микробы обладают потрясающей устойчивостью к вредным факторам окружающей среды. Амплитуда колебаний температуры, при которой микробы жизнеспособны, находится в пределах от −270 до 400 °C. Некоторые виды микробов размножаются даже в ядерных реакторах и сохраняются в космосе.

Изучение влияния факторов космического полета и открытого космоса на состояние систем микроорганизмы — конструкционные материалы орбитальных станции явилось подтверждением способности представителей прокариот и микроскопических эу-

кариот выживать в условиях открытого космоса в течение 18 мес, что может быть соизмеримо по времени с длительностью полета на Марс и возвращения на Землю.

Подчеркивая исключительную роль микробов, основатель микробиологии выдающийся французский ученый Луи Пастер писал: «Микробы — бесконечно малые существа, играющие в природе бесконечно большую роль».

Микробы могут заселять наружные покровы и слизистые оболочки других живых организмов, вступая с ними в симбиоз. Сотни видов микробов способны вызывать заболевания у человека и животных, которые называются патогенными.

Для **патогенных микробов** характерны инфективность, включающая адгезию (прилипание к клеткам) и колонизацию экологических ниш в организме человека; инвазивность — способность микробов перемещаться из первоначально колонизируемой ниши в другие, проникать в глубь тканей и клеток; токсичность — способность нарушать процессы метаболизма или работу жизненно важных центров организма человека.

**Условно-патогенные микробы** вызывают болезни у человека лишь при определенных условиях. Свыше 400 видов условно-патогенных микробов могут вызвать заболевания у человека. Среди них есть микробы, обитающие в пищевых продуктах, почве, воде, отходах деятельности человека. Они способны существовать в организме человека, но это не является необходимым этапом в их развитии и размножении.

Значительная часть условно-патогенных микробов является постоянными обитателями различных экологических ниш организма человека, которые называются резидентами.

**Микробы-резиденты** состоят в симбиотических отношениях с организмом и приносят ему большую пользу, когда находятся под контролем иммунной системы и механизмов неспецифической резистентности. Однако при определенных условиях они выходят из-под контроля иммунной системы и причиняют вред организму. Заболевания, вызываемые резидентами, называются **оппортунистическими**.

Медицинская микробиология — это прежде-всего наука о микробах, способных заселить (колонизировать) организм человека и/или вступить во взаимодействие с ним, а также о методах диагностики, профилактики и лечения инфекционных болезней, вы-

зываемых бактериями и доклеточными инфекционными агентами — вирусами, вироидами, прионами.

Предметом изучения медицинской микробиологии являются патогенные (болезнетворные) и условно-патогенные (в том числе резидентные виды, населяющие организм здорового человека) микробы.

Каждый раздел медицинской микробиологии позволяет проанализировать изучаемый объект — микроб.

Морфология микробов — это раздел микробиологии, изучающий форму, структуру и строение микробных клеток. Физиология микробов изучает биологические функции: метаболизм, транспорт питательных веществ, питание, дыхание, рост и размножение (репродукцию). Генетика бактерий изучает строение бактериального генома, механизмы наследственности и изменчивости. Таксономия бактерий изучает систематику многообразного микробного мира, деление бактерий на типы, классы, порядки и другие таксономические группы.

## 1.2. Задачи и методы медицинской микробиологии

Важнейшей задачей медицинской микробиологии является выявление микробов-возбудителей инфекционных болезней. Поэтому методы микробиологии направлены на изучение свойств микробов, обусловливающих их патогенное действие, и процессы, которые возникают под их влиянием в организме человека и животных.

К основным методам микробиологии относятся:

- микроскопический — изучение морфологии микробов с использованием специальной микроскопической техники;
- бактериологический (культуральный) — получение чистых культур микробов и изучение их биологических свойств, позволяющие провести идентификацию, т.е. определение, вида микроба;
- серологический — выявление антител к возбудителям в биологических жидкостях организма больного (чаще в сыворотке крови; от лат. *serum* — сыворотка);
- аллергологический — оценка аллергических феноменов, возникающих в организме человека (на коже, слизистых оболоч-

ках или в крови) под действием компонентов или цельных клеток микроба-возбудителя;
- биологический — моделирование инфекционных процессов на лабораторных животных или куриных эмбрионах;
- хемотаксономический — изучение микробов по продуктам их жизнедеятельности непосредственно в организме (без предварительного культивирования на питательных средах). Для этого применяют газовую и газожидкостную хроматографию;
- молекулярно-биологический — изучение состава микробных нуклеиновых кислот с помощью полимеразной цепной реакции, сиквенирования и гибридизации ДНК.

Помимо диагностики инфекционных заболеваний, медицинская микробиология разрабатывает методы создания специфических средств профилактики (получение вакцин) и терапии (иммунные сыворотки) инфекционных болезней. Современная медицинская биотехнология как наука, отделившаяся от микробиологии в XX веке, позволяет создать принципиально новые генно-инженерные вакцины, синтетические иммуномодуляторы, диагностикумы и вакцинные препараты.

Это особенно важно в связи с обнаружением возбудителей новых инфекционных болезней. За последние 30–40 лет появилось свыше 50 новых микробов — возбудителей опасных инфекционных болезней: болезни легионеров, геморрагической лихорадки Марбург, Эбол, инфекционного Т-клеточного лейкоза, ВИЧ-инфекции, гепатитов С, D, Е, *TTV*, атипичной пневмонии (ТОРС — тяжелый острый респираторный синдром; англ. *SARS — sev. acuto resp. sindr.*), губчатой энцефалопатии (коровье бешенство), птичьего гриппа и т.д.

С древнейших времен человек использовал процессы, в которых принимают участие микробы, для получения пищевых продуктов: приготовления теста, квашения капусты и овощей, пивоварения, виноделия, получения молочнокислых продуктов, сыра и т.п. В повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с продуктами, получаемыми при непосредственном участии микробов. Это антибиотики, витамины, ферменты, кровезаменители, различные органические кислоты. По скорости производства белка микробы не имеют себе равных среди живых существ.

Какое место занимают микробы на иерархической лестнице живых существ? До открытия микробов все живые существа от-

носили к двум царствам: растений и животных. Микробы были отнесены к третьему царству — протистов (Э. Геккель), которое разделили на высшие протисты (грибы, водоросли и простейшие) и низшие протисты (бактерии и сине-зеленые водоросли).

После того как английский физик Р. Гук с помощью примитивного микроскопа открыл клетку (1665), понадобилось еще более чем полтора столетия, пока в 1839 г. не была сформулирована клеточная теория строения органического мира Т. Шванном (1810–1882) и М. Шлейденом (1804–1881).

Оказалось, что все живое на Земле независимо от того, относится ли оно к царству животных или растений, построено из элементарных единиц — клеток. Клетка является основной структурной единицей любой живой материи, т.е. общим знаменателем в конструкции организмов.

Дальнейшее изучение морфологии и анатомии клеток выявило различие в клетках. Р. Мерей в 1968 г., основываясь на принципиальных различиях строения клеток, предложил все клеточные организмы разделить на два царства: **прокариотов** (от греч. про — до, карион — ядро, т.е. доядерные) и **эукариотов** (эу — хорошо, т.е. с настоящим, истинным ядром). Микробы есть в обоих царствах, а бактерии принадлежат только к царству прокариотов.

Принципиальное отличие прокариотов от эукариотов заключается в том, что эукариоты имеют четко дифференцированное ядро, отграниченное от цитоплазмы ядерной мембраной. Такого ядра у прокариотической клетки нет. У нее есть аналог — нуклеоид, представляющий собой двунитевую, ковалентно-замкнутую молекулу ДНК. Ее часто называют хромосомой, хотя, в отличие от хромосом эукариотов, с ней не соединены белки-гистоны.

## 1.3. Открытие и изучение мира микробов

Удивительный мир микробов открыл голландский коммерсант Антоний Ван Левенгук (1632–1723). Его страстным увлечением было изготовление линз-чечевиц, которые он называл микроскопиями. Эти одинарные двояковыпуклые стекла, отлично отшлифованные и оправленные в серебро или латунь, давали увеличение до 300 раз. В дальнейшем он сконструировал прибор, напоминающий современный микроскоп.



А. Левенгук
(1632–1723)

Левенгук знаменит тем, что открыл микробы (1676) — огромный мир мелких «зверушек», как он их называл «анималькулей». «Сколько чудес таят в себе эти крохотные создания», — писал он в одном из писем в Лондонское королевское общество, членом которого был избран. Исследуя зубной налет, он отмечал: «В полости моего рта их было наверное больше, чем людей в Соединенном Королевстве. Я видел в материале множество простейших животных, весьма оживленно двигавшихся. Они в десятки тысяч раз тоньше волоска из моей бороды».

Левенгук увидел и описал все формы микробов: кокки, палочковидные и извитые. Он повсюду обнаруживал этих маленьких «зверушек»: в дождевой воде, воде каналов, настое корней растений, испражнениях, зубном налете — и пришел к выводу, что окружающий мир густо заселен микробами.

Открытый Левенгуком мир микробов был настолько фантастическим, что на протяжении почти 50 последующих лет вызывал всеобщее изумление.

Однако вначале существование микробов было воспринято научной общественностью только как интересный факт, как курьез, который не имеет существенного практического значения. И только в дальнейшем благодаря развитию микроскопической техники во второй половине XIX века и работам великого французского химика Луи Пастера (1822–1895) по изучению процессов брожения мир микроскопических существ вновь начинает привлекать к себе внимание исследователей.

В 1856 г. Л. Пастер решает очень важную проблему болезней вина и пива. Во Франции большое количество вина и пива портилось, и страна несла колоссальные убытки. Пастер установил, что в этих продуктах развивается много посторонней микрофлоры, попадающей из воздуха и используемой аппаратуры. Он предложил прогревать указанные продукты при 50–60 °С, что приводило к гибели вегетативных форм микробов. Этот метод получил название пастеризации. С целью уничтожения спор микробов Л. Па-



Л. Пастер
(1822–1895)

стер предложил стерилизацию жидкостей при 120 °С, а твердых предметов при 140 °С.

В 1868 г. Л. Пастер спас промышленность Франции, производящую шелк, показав, что болезни шелковичных червей, формирующих шелковые нити, вызываются микробами, и предложив меры профилактики.

Открыв микробную природу брожения, гниения и болезни шелковичных червей, Л. Пастер делает вывод, что причиной инфекционных заболеваний человека и животных являются живые микробы. Ученый открыл возбудителей куриной холеры, родильной горячки, остеомиелита, септицемии, абсцессов.

С 1880 по 1885 г. Пастер разрабатывает и создает метод приготовления вакцин для профилактики заразных болезней. Получив вакцины против куриной холеры, сибирской язвы и бешенства, он делает очень важный вывод, что ослабленные (аттенуированные) микробы, введенные в организм, создают в нем иммунитет против последующих заражений вирулентными микробами.

Отмечая исключительный вклад Л. Пастера в создание вакцины против бешенства, станции, где проводили иммунизацию его вакциной, назвали пастеровскими. Первая в России и вторая в мире пастеровская станция была открыта в Одессе в 1886 г. И.И. Мечниковым и Н.Ф. Гамалеем.

Своими гениальными трудами Л. Пастер утвердил в микробиологии физиологический метод исследования, доказал этиологическую роль микробов, разработал научный принцип вакцинации, т.е. явился основоположником микробиологии.

Л. Пастер по праву считается отцом микробиологии и иммунологии — с его именем связаны важнейшие открытия, положившие начало этим наукам. В 1885 г. Л. Пастер создал вакцину против бешенства. Антирабическая вакцина (*rabies* — бешенство) была

приготовлена из фиксированного вируса бешенства (вирус — от франц. яд или токсин). Спустя более чем столетие этот термин приобрел новое, современное содержание.

Имя Л. Пастера носит основанный им (в 1888 г. на средства, собранные по международной подписке) институт в Париже. Пастеровский институт стал центром мировой микробиологической науки в XIX веке и удерживает эти позиции до сих пор. Последователями французской школы были работавшие в Пастеровском институте выдающиеся русские ученые И.И. Мечников, С.Н. Виноградский, Н.Ф. Гамалея, В.М. Хавкин, А.М. Безредка и др.

Параллельно со школой Л. Пастера развивалась и достигла больших успехов немецкая школа микробиологов, основоположником которой был Роберт Кох (1843–1910). Ему удалось культивировать и описать возбудителя сибирской язвы (1876), стафилококка (1878), возбудителей раневых инфекций и столбняка (1889), возбудителя туберкулеза (палочка Коха) и туберкулина, который нашел применение в диагностике этой инфекции, холерного вибриона и пути его передачи (1883–1884 гг.), открыл возбудителей возвратного тифа, трипаносомоза и других инфекций.


Р. Кох
(1843–1910)

В 1891 г. Р. Кох возглавил основанный им Институт инфекционных болезней в Берлине. Р. Кох создал многие важнейшие методы исследования: ввел в практику анилиновые красители, предложил использовать в микроскопии иммерсионные системы и конденсор, разработал метод культивирования микроорганизмов на биологических жидкостях и плотных питательных средах, ввел в практику метод дробных посевов. В 1905 г. он был удостоен Нобелевской премии по физиологии и медицине за открытие и выделение возбудителя туберкулеза.

Ярким представителем немецкой школы микробиологов был Пауль Эрлих (1854–1915). Начиная с 1891 г. П. Эрлих занимался поисками путей получения химических соединений, способных подавлять жизнедеятельность возбудителей заболеваний. Ввел в практику лечение четырехдневной малярии красителем метиленовым синим, предложил использовать трипановый красный для

лечения трипаносомоза. Особое значение имели работы П. Эрлиха по лечению сифилиса органическими соединениями мышьяка. В 1907 г. П. Эрлих сообщил об открытии арсфенамина (производного арсенобензола) — эффективного средства против сифилиса, которое ученый назвал сальварсаном (от лат. *salvatio* — спасение). Вещество известно также под названием препарат 606, поскольку было 606-м по счету из опробованных Эрлихом соединений. Вскоре появился и неосальварсан, или препарат 914.



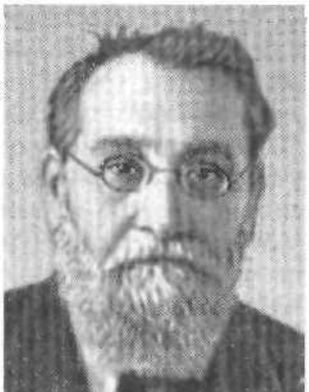
П. Эрлих
(1854–1915)

В 1890–1895 гг. П. Эрлих, работая у Р. Коха в Институте инфекционных болезней в Берлине, разработал метод определения активности антитоксических сывороток и изучения взаимодействия антиген–антитело *in vitro*. Создал теорию боковых цепей, сыгравшую большую роль в развитии иммунологии. В 1896 г. основал и возглавил Институт по изучению и проверке сывороток (ныне носит имя П. Эрлиха). За создание теории гуморального иммунитета был удостоен Нобелевской премии в 1908 г.

Основываясь на принципах гуморальной иммунной теории, разработанной П. Эрлихом, Э. Беринг в 1890 г. получил антитоксическую сыворотку для лечения дифтерии, а в 1923 г. Рамон — дифтерийный анатоксин.

Большой вклад в развитие медицинской микробиологии внесли отечественные ученые. Своими открытиями они способствовали расцвету новых областей микробиологической науки.

С именем И.И. Мечникова связано возникновение современной иммунологии. За открытие фагоцитарной теории иммунитета в 1908 г. И.И. Мечникову была присуждена Нобелевская премия.



И.И. Мечников
(1845–1916)

Нашему отечественному ученому Д.И. Ивановскому принадлежит честь открытия вирусов. В 1944 г. известный

американский вирусолог У. Стенли писал: «Я полагаю, что имя Ивановского в науке о вирусах следует рассматривать почти в том же свете, как имена Пастера и Коха в микробиологии».

Большой вклад в изучение инфекционного процесса и борьбу с эпидемиями внесли многие отечественные микробиологи. Н.Ф. Гамалею (1859–1949) принадлежат заслуги в области ликвидации оспы в нашей стране. Он был автором многочисленных научных исследований, в том числе посвященных бешенству, холере, чуме и другим серьезным проблемам. Чрезвычайно большую роль имели работы Л.С. Ценковского (1822–1887) по борьбе с сибирской язвой.

Благодаря самоотверженной деятельности Г.Н. Габричевского (1860–1907) в России было организовано производство противодифтерийной сыворотки, создана вакцина от скарлатины. Г.Н. Габричевский основал первый в России бактериологический институт и первую кафедру микробиологии в Московском государственном университете.

В работах С.Н. Виноградского (1856–1953) заложены основы современного понимания метаболизма прокариот и возникла новая наука — почвенная микробиология.

Большой вклад в развитие отечественной микробиологии и эпидемиологии внесли отечественные ученые-микробиологии Л.А. Тарасевич (1868–1927), Д.К. Заболотный (1866–1929), П.В. Циклинская (1859–1923).

В 1943 г. благодаря работам З.В. Ермольевой (1898–1979) и Г.Ф. Гаузе были получены первые отечественные антибиотики — пенициллин, грамицидин С, стрептомицин, создан первый в России институт получения антибиотиков.

Широкую известность за рубежом получили работы советских ученых: П.Ф. Здродовского (1890–1976) — по исследованию риккетсиозов, вирусно-генетическая теория канцерогенеза А.А. Зильбера (1894–1966), М.П. Чумакова и А.А. Смородинцева (1901–1986) — по исследованию вирусных энцефалитов и созданию отечественной вакцины против полиомиелита, П.Н. Кашкина (1902–1992) — по исследованию грибов и созданию отечественной медицинской микологии, Н.П. Елинова, А.А. Воробьева — по созданию новых микробных биотехнологий и многих других.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Отметьте ученого, кому принадлежала честь в создании первой вакцины против бешенства:

1. Л. Пастер.
2. Р. Кох.
3. И. Мечников.
4. А. Левенгук.

**Б.** Отметьте ученого, кому принадлежала честь создать фагоцитарную теорию иммунитета, за которую он был удостоен Нобелевской премии:

1. Л. Пастер.
2. Р. Кох.
3. И. Мечников.
4. П. Эрлих.

**В.** Отметьте ученого, кому принадлежала честь первому культивировать и описать возбудителей туберкулеза и холеры:

1. П. Эрлих.
2. И. Мечников.
3. Л. Пастер.
4. Р. Кох.

# Глава 2

# МОРФОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОБОВ

## 2.1. Систематика и номенклатура микробов

Мир микробов можно разделить на клеточные и неклеточные формы. Клеточные формы микробов представлены бактериями, грибами и простейшими. Их можно называть микроорганизмами. Неклеточные формы представлены вирусами, вироидами и прионами.

Новая классификация клеточных микробов включает следующие таксономические единицы: домены, царства, типы, классы, порядки, семейства, роды, виды. В основу классификации микроорганизмов положены их генетическое родство, а также морфологические, физиологические, антигенные и молекулярно-биологические свойства.

Вирусы нередко рассматриваются не как организмы, а как автономные генетические структуры, поэтому они будут рассмотрены отдельно.

Клеточные формы микробов разделены на три домена. Домены *Bacteria* и *Archaebacteria* включают микробы с прокариотическим типом строения клетки. Представители домена *Eukarya* являются эукариотами. Он состоит из 4 царств:

- царства грибов (*Fungi*, *Eumycota*);
- царства простейших (*Protozoa*);
- царства *Chromista* (хромовики);
- микробов с неуточненным таксономическим положением (*Microspora*, микроспоридии).

Различия в организации прокариотической и эукариотической клеток представлены в табл. 2.1.

**Таблица 2.1.** Признаки прокариотической и эукариотической клетки

| **Отличительный признак** | **Эукариотическая клетка** | **Прокариотическая клетка** |
|---|---|---|
| Наличие истинного ядра, отделенного от цитоплазмы ядерной мембраной, в котором присутствуют ядрышко и связанные с молекулой ДНК белки-гистоны | + | Истинное ядро отсутствует, вместо него присутствует нуклеоид с гаплоидным набором генов |
| Наличие в цитоплазме вторичных мембранных образований (митохондрии, аппарат Гольджи, эндоплазматический ретикулум) | + | – |
| Присутствие стеролов в цитоплазматической мембране | + | – (за исключением микоплазм) |
| Рибосомы | Типа 80S | Типа 70S |
| Наличие в клеточной стенке пептидогликана | + | – |

## 2.2. Классификация и морфология бактерий

Термин «бактерия» происходит от слова *bacterion*, что означает палочка. Бактерии относятся к прокариотам. Их разделяют на два домена: *Bacteria* и *Archaebacteria*. Бактерии, входящие в домен *Archaebacteria*, представляют одну из древнейших форм жизни. Они имеют особенности строения клеточной стенки (у них отсутствует пептидогликан) и рибосомальной РНК. Среди них отсутствуют возбудители инфекционных заболеваний.

Внутри домена бактерии подразделяются на следующие таксономические категории: класс, тип, порядок, семейство, род, вид. Одной из основных таксономических категорий является *вид* (*species*). Вид — это совокупность особей, имеющих единое происхождение и генотип, объединенные по близким свойствам, отличающим их от других представителей рода. Название вида соответствует бинарной номенклатуре, т.е. состоит из двух слов. Например, возбудитель дифтерии пишется как *Corynebacterium diphtheriae*. Первое слово — название рода и пишется с прописной буквы, второе слово обозначает вид и пишется со строчной буквы.

При повторном упоминании вида родовое название сокращается до начальной буквы, например *C. diphtheriae*.

*Совокупность однородных микроорганизмов, выделенных* на питательной среде, характеризующихся сходными морфологическими, тинкториальными (отношение к красителям), культуральными, биохимическими и антигенными свойствами, называется *чистой культурой*. Чистая культура микроорганизмов, выделенных из определенного источника и отличающихся от других представителей вида, называется *штаммом*. Близким к понятию «штамм» является понятие «клон». Клон представляет собой совокупность потомков, выращенных из единственной микробной клетки.

Для обозначения некоторых совокупностей микроорганизмов, отличающихся по тем или иным свойствам, употребляется суффикс «вар» (разновидность), поэтому микроорганизмы в зависимости от характера различий обозначают как морфовары (отличие по морфологии), резистентовары (отличие по устойчивости, например, к антибиотикам), серовары (отличие по антигенам), фаговары (отличие по чувствительности к бактериофагам), биовары (отличие по биологическим свойствам), хемовары (отличие по биохимическим свойствам) и т.д.

Раньше основу классификации бактерий составляла особенность строения клеточной стенки. Подразделение бактерий по особенностям строения клеточной стенки связано с возможной вариабельностью их окраски в тот или иной цвет по методу Грама. Согласно этому методу, предложенному в 1884 г. датским ученым X. Грамом, в зависимости от результатов окраски бактерии делятся на грамположительные, окрашиваемые в сине-фиолетовый цвет, и грамотрицательные, окрашиваемые в красный цвет.

В настоящее время основу классификации составляет степень генетического родства, основанная на изучении строения генома рибосомных РНК (рРНК) (см. главу 5), определении процентного содержания в геноме гуанинцитозиновых пар (ГЦ-пары), построении рестрикционной карты генома, изучении степени гибридизации. Также учитываются и фенотипические показатели: отношение к окраске по Граму, морфологические, культуральные и биохимические свойства, антигенная структура.

Домен *Bacteria* включает 23 типа, из которых медицинское значение имеют нижеизложенные.

Большинство грамотрицательных бактерий объединены в тип *Proteobacteria* (по имени греческого бога *Proteus*, способного принимать различные облики). Тип *Proteobacteria* подразделен на 5 классов:

- класс *Alphaproteobacteria* (роды *Rickettsia*, *Orientia*, *Erlichia*, *Bartonella*, *Brucella*);
- класс *Betaproteobacteria* (роды *Bordetella*, *Burholderia*, *Neisseria*, *Spirillum*);
- класс *Gammaproteobacteria* (представители семейства *Enterobacteriaceae*, роды *Francisella*, *Legionella*, *Coxiella*, *Pseudomonas*, *Vibrio*);
- класс *Deltaproteobacteria* (род *Bilophila*);
- класс *Epsilonproteobacteria* (роды *Campilobacter*, *Helicobacter*).

Грамотрицательные бактерии входят также в следующие типы: тип *Chlamydiae* (роды *Chlamydia*, *Chlamydophila*), тип *Spirochaetes* (роды *Spirocheta*, *Borrelia*, *Treponema*, *Leptospira*); тип *Bacteroides* (роды *Bacteroides*, *Prevotella*, *Porphyromonas*).

Грамположительные бактерии входят в следующие типы:

- тип *Firmicutes* включает класс *Clostridium* (роды *Clostridium*, *Peptococcus*), класс *Bacilli* (*Listeria*, *Staphylococcus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*) и класс *Mollicutes* (роды *Mycoplasma*, *Ureaplasma*), которые являются бактериями, не имеющими клеточную стенку;
- тип *Actinobacteria* (роды *Actinomyces*, *Micrococcus*, *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, *Gardnerella*, *Bifidobacterium*, *Propionibacterium*, *Mobiluncus*).

### 2.2.1. Морфологические формы бактерий

Различают несколько основных форм бактерий: кокковидные, палочковидные, извитые и ветвящиеся (рис. 2.1).

*Сферические формы, или кокки* — шаровидные бактерии размером 0,5–1 мкм, которые по взаимному расположению делятся на микрококки, диплококки, стрептококки, тетракокки, сарцины и стафилококки.

Микрококки (от греч. *micros* — малый) — отдельно расположенные клетки.

Диплококки (от греч. *diploos* — двойной), или парные кокки, располагаются парами (пневмококк, гонококк, менингококк), так как клетки после деления не расходятся. Пневмококк (возбудитель пневмонии) имеет с противоположных сторон ланцетовидную форму, а гонококк (возбудитель гонореи) и менингококк (возбу-

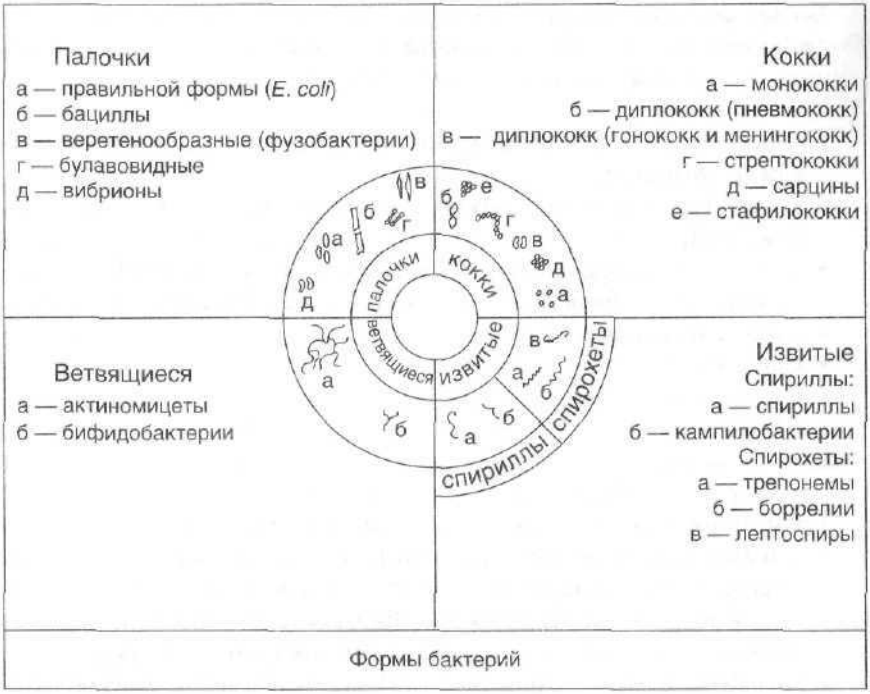



**Рис. 2.1.** Формы бактерий

дитель эпидемического менингита) имеют форму кофейных зерен, обращенных вогнутой поверхностью друг к другу.

Стрептококки (от греч. *streptos* — цепочка) — клетки округлой или вытянутой формы, составляющие цепочку вследствие деления клеток в одной плоскости и сохранения связи между ними в месте деления.

Сарцины (от лат. *sarcina* — связка, тюк) располагаются в виде пакетов из 8 кокков и более, так как они образуются при делении клетки в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

Стафилококки (от греч. *staphyle* — виноградная гроздь) — кокки, расположенные в виде грозди винограда в результате деления в разных плоскостях.

*Палочковидные бактерии* различаются по размерам, форме концов клетки и взаимному расположению клеток. Длина клеток 1–10 мкм, толщина 0,5–2 мкм. Палочки могут быть правильной

(кишечная палочка и др.) и неправильной булавовидной (коринебактерии и др.) формы. К наиболее мелким палочковидным бактериям относятся риккетсии.

Концы палочек могут быть как бы обрезанными (сибиреязвенная бацилла), закругленными (кишечная палочка), заостренными (фузобактерии) или в виде утолщения. В последнем случае палочка похожа на булаву (коринебактерии дифтерии).

Слегка изогнутые палочки называются вибрионами (холерный вибрион). Большинство палочковидных бактерий располагается беспорядочно, так как после деления клетки расходятся. Если после деления клетки остаются связанными общими фрагментами клеточной стенки и не расходятся, то они располагаются под углом друг к другу (коринебактерии дифтерии) или образуют цепочку (сибиреязвенная бацилла).

*Извитые формы* — спиралевидные бактерии, которые бывают двух видов: спириллы и спирохеты. Спириллы имеют вид штопорообразно извитых клеток с крупными завитками. К патогенным спириллам относятся возбудитель содоку (болезнь укуса крыс), а также кампилобактерии и хеликобактерии, имеющие изгибы, напоминающие крылья летящей чайки. Спирохеты представляют тонкие длинные извитые бактерии, отличающиеся от спирилл более мелкими завитками и характером движения. Особенность их строения описана ниже.

*Ветвящиеся* — палочковидные бактерии, которые могут иметь разветвление в форме латинской буквы Y, встречающиеся у бифидобактерий, также быть представленными в виде нитевидных разветвленных клеток, способных переплетаться, образуя мицелий, что наблюдается у актиномицет.

### 2.2.2. Структура бактериальной клетки

Структура бактерий хорошо изучена с помощью электронной микроскопии целых клеток и их ультратонких срезов, а также других методов. Бактериальную клетку окружает оболочка, состоящая из клеточной стенки и цитоплазматической мембраны. Под оболочкой находится протоплазма, состоящая из цитоплазмы с включениями и наследственного аппарата — аналога ядра, называемого нуклеоидом (рис. 2.2). Имеются дополнительные структуры: капсула, микрокапсула, слизь, жгутики, пили. Некоторые бактерии в неблагоприятных условиях способны образовывать споры.

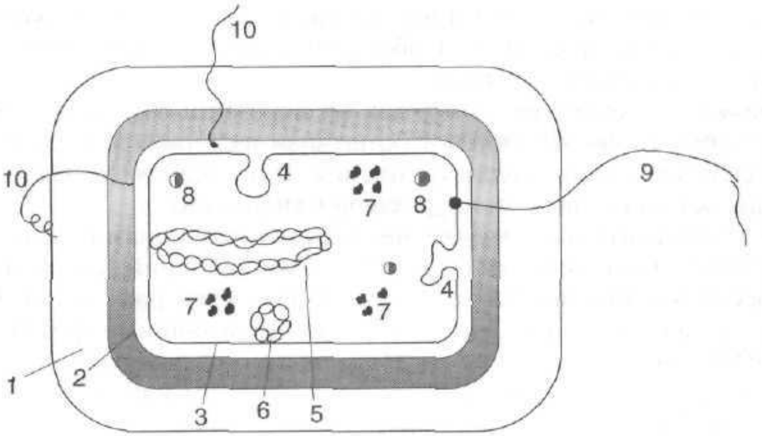



**Рис. 2.2.** Структура бактериальной клетки: 1 — капсула; 2 — клеточная стенка; 3 — цитоплазматическая мембрана; 4 — мезосомы; 5 — нуклеоид; 6 — плазмида; 7 — рибосомы; 8 — включения; 9 — жгутик; 10 — пили (ворсинки)

**Клеточная стенка** — *прочная, упругая структура*, придающая бактерии определенную форму и вместе с подлежащей цитоплазматической мембраной сдерживающая высокое осмотическое давление в бактериальной клетке. Она участвует в процессе деления клетки и транспорте метаболитов, имеет рецепторы для бактериофагов, бактериоцинов и различных веществ. Наиболее толстая клеточная стенка у грамположительных бактерий (рис. 2.3). Так, если толщина клеточной стенки грамотрицательных бактерий около 15–20 нм, то у грамположительных она может достигать 50 нм и более.

Основу клеточной стенки бактерий составляет *пептидогликан*. Пептидогликан является полимером. Он представлен параллельными полисахаридными гликановыми цепями, состоящими из повторяющихся остатков N-ацетилглюкозамина и N-ацетилмурамовой кислоты, соединенных гликозидной связью. Эту связь разрывает лизоцим, являющийся ацетилмурамидазой.

К N-ацетилмурамовой кислоте ковалентными связями присоединен тетрапептид. Тетрапептид состоит из L-аланина, который связан с N-ацетилмурамовой кислотой; D-глутамина, который у грамположительных бактерий соединен с L-лизином, а у грамотри-

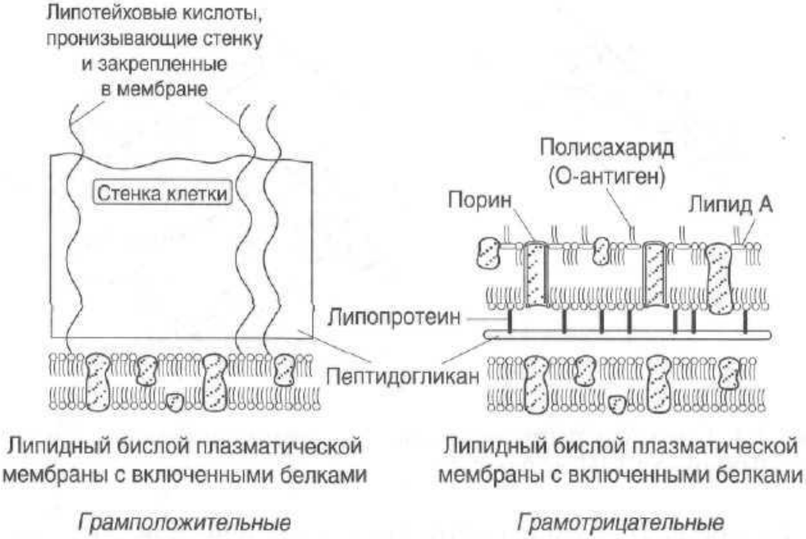



**Рис. 2.3.** Схема архитектоники клеточной стенки бактерий

цательных бактерий — с диаминопимелиновой кислотой (ДАП), которая представляет собой предшественник лизина в процессе бактериального биосинтеза аминокислот и является уникальным соединением, присутствующим только у бактерий; 4-й аминокислотой является D-аланин (рис. 2.4).

В клеточной стенке грамположительных бактерий содержится небольшое количество полисахаридов, липидов и белков. Основным компонентом клеточной стенки этих бактерий является многослойный пептидогликан (муреин, мукопептид), составляющий 40–90% массы клеточной стенки. Тетрапептиды разных слоев пептидогликана у грамположительных бактерий соединены друг с другом полипептидными цепочками из 5 остатков глицина (пентаглицина), что придает пептидогликану жесткую геометрическую структуру (рис. 2.4, б). С пептидогликаном ктеточной стенки грамположительных бактерий ковалентно связаны *тейхоевые кислоты* (от греч. *tekhos* — стенка), молекулы которых представляют собой цепи из 8–50 остатков глицерола и рибитола, соединенных фосфатными мостиками. Форму и прочность бактериям придает жесткая волокнистая структура многослойного, с поперечными пептидными сшивками пептидогликана.

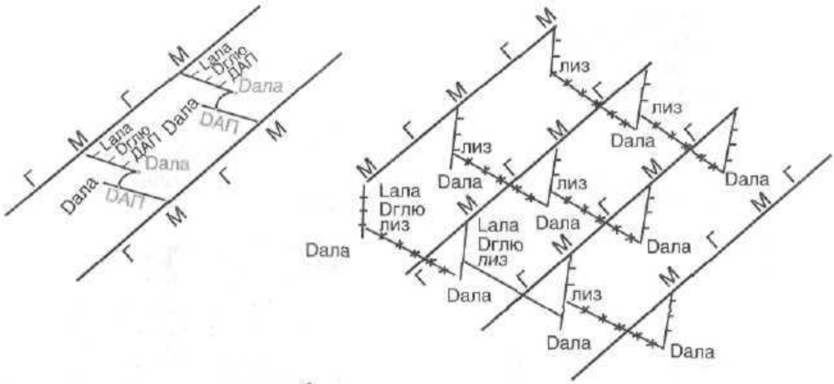



**Рис. 2.4.** Структура пептидогликана: а — грамотрицательные бактерии; б — грамположительные бактерии

Способность грамположительных бактерий при окраске по Граму удерживать генциановый фиолетовый в комплексе с йодом (сине-фиолетовая окраска бактерий) связана со свойством многослойного пептидогликана взаимодействовать с красителем. Кроме этого последующая обработка мазка бактерий спиртом вызывает сужение пор в пептидогликане и тем самым задерживает краситель в клеточной стенке.

Грамотрицательные бактерии после воздействия спиртом утрачивают краситель, что обусловлено меньшим количеством пептидогликана (5–10% массы клеточной стенки); они обесцвечиваются спиртом, и при обработке фуксином или сафранином приобретают красный цвет. Это связано с особенностями строения клеточной стенки. Пептидогликан в клеточной стенке грамотрицательных бактерий представлен 1–2 слоями. Тетрапептиды слоев соединены между собой прямой пептидной связью между аминогруппой ДАП одного тетрапептида и карбоксильной группой D-аланина тетрапептида другого слоя (рис. 2.4, а). Кнаружи от пептидогликана расположен слой *липопротеина*, соединенный с пептидогликаном через ДАП. За ним следует *наружная мембрана* клеточной стенки.

**Наружная мембрана** является мозаичной структурой, представленной липополисахаридами (ЛПС), фосфолипидами и белками. Внутренний слой ее представлен фосфолипидами, а в наружном слое расположен ЛПС (рис. 2.5). Таким образом, наружная мем-

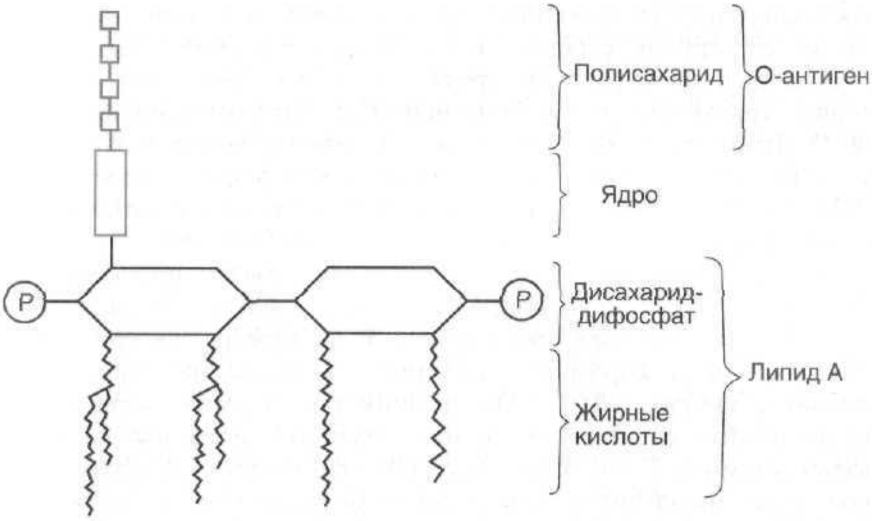



**Рис. 2.5.** Структура липополисахарида

брана асимметрична. ЛПС наружной мембраны состоит из трех фрагментов:

- липида А — консервативной структуры, практически одинаковой у грамотрицательных бактерий. Липид А состоит из фосфорилированных глюкозоаминовых дисахаридных единиц, к которым прикреплены длинные цепочки жирных кислот (см. рис. 2.5);
- ядра, или стержневой, коровой части (от лат. *core* — ядро), относительно консервативной олигосахаридной структуры;
- высоковариабельной О-специфической цепи полисахарида, образованной повторяющимися идентичными олигосахаридными последовательностями.

ЛПС заякорен в наружной мембране липидом А, обусловливающим токсичность ЛПС и отождествляемым поэтому с эндотоксином. Разрушение бактерий антибиотиками приводит к освобождению большого количества эндотоксина, что может вызвать у больного эндотоксический шок. От липида А отходит ядро, или стержневая часть ЛПС. Наиболее постоянной частью ядра ЛПС является кетодезоксиоктоновая кислота. О-специфическая полисахаридная цепь, отходящая от стержневой части молекулы ЛПС,

состоящая из повторяющихся олигосахаридных единиц, обусловливает серогруппу, серовар (разновидность бактерий, выявляемая с помощью иммунной сыворотки) определенного штамма бактерий. Таким образом, с понятием ЛПС связаны представления об О-антигене, по которому можно дифференцировать бактерии. Генетические изменения могут привести к дефектам, укорочению ЛПС бактерий и появлению в результате этого шероховатых колоний R-форм, теряющих О-антигенную специфичность.

Не все грамотрицательные бактерии имеют полноценную О-специфическую полисахаридную цепь, состоящую из повторяющихся олигосахаридных единиц. В частности, бактерии рода *Neisseria* имеют короткий гликолипид, который называется липоолигосахаридом (ЛОС). Он сравним с R-формой, потерявшей О-антигенную специфичность, наблюдаемой у мутантных шероховатых штаммов *E. coli.* Структура ЛОС напоминает структуру гликосфинголипида цитоплазматической мембраны человека, поэтому ЛОС мимикрирует микроб, позволяя ему избегать иммунного ответа хозяина.

Белки матрикса наружной мембраны пронизывают ее таким образом, что молекулы белка, называемые *поринами*, окаймляют гидрофильные поры, через которые проходят вода и мелкие гидрофильные молекулы с относительной массой до 700 Д.

Между наружной и цитоплазматической мембраной находится *периплазматическое пространство,* или периплазма, содержащая ферменты (протеазы, липазы, фосфатазы, нуклеазы, β-лактамазы), а также компоненты транспортных систем.

При нарушении синтеза клеточной стенки бактерий под влиянием лизоцима, пенициллина, защитных факторов организма и других соединений образуются клетки с измененной (часто шаровидной) формой: *протопласты* — бактерии, полностью лишенные клеточной стенки; *сферопласты* — бактерии с частично сохранившейся клеточной стенкой. После удаления ингибитора клеточной стенки такие измененные бактерии могут реверсировать, т.е. приобретать полноценную клеточную стенку и восстанавливать исходную форму.

Бактерии сферо- или протопластного типа, утратившие способность к синтезу пептидогликана под влиянием антибиотиков или других факторов и способные размножаться, называются *L-формами* (от названия Института им. Д. Листера, где они впер-

вые были изучены). L-формы могут возникать и в результате мутаций. Они представляют собой осмотически чувствительные, шаровидные, колбовидные клетки различной величины, в том числе и проходящие через бактериальные фильтры. Некоторые L-формы (нестабильные) при удалении фактора, приведшего к изменениям бактерий, могут реверсировать, возвращаясь в исходную бактериальную клетку. L-формы могут образовывать многие возбудители инфекционных болезней.

**Цитоплазматическая мембрана** при электронной микроскопии ультратонких срезов представляет собой трехслойную мембрану (2 темных слоя толщиной по 2,5 нм каждый разделены светлым — промежуточным). По структуре она похожа на плазмолемму клеток животных и состоит из двойного слоя липидов, главным образом фосфолипидов, с внедренными поверхностными, а также интегральными белками, как бы пронизывающими насквозь структуру мембраны. Некоторые из них являются пермеазами, участвующими в транспорте веществ. В отличие от эукариотических клеток, в цитоплазматической мембране бактериальной клетки отсутствуют стеролы (за исключением микоплазм).

Цитоплазматическая мембрана является динамической структурой с подвижными компонентами, поэтому ее представляют как мобильную текучую структуру. Она окружает наружную часть цитоплазмы бактерий и участвует в регуляции осмотического давления, транспорте веществ и энергетическом метаболизме клетки (за счет ферментов цепи переноса электронов, аденозинтрифосфатазы — АТФазы и др.). При избыточном росте (по сравнению с ростом клеточной стенки) цитоплазматическая мембрана образует инвагинаты — впячивания в виде сложно закрученных мембранных структур, называемые *мезосомами.* Менее сложно закрученные структуры называются внутрицитоплазматическими мембранами. Роль мезосом и внутрицитоплазматических мембран до конца не выяснена. Предполагают даже, что они являются артефактом, возникающим после приготовления (фиксации) препарата для электронной микроскопии. Тем не менее считают, что производные цитоплазматической мембраны участвуют в делении клетки, обеспечивая энергией синтез клеточной стенки, принимают участие в секреции веществ, спорообразовании, т.е. в процессах с высокой затратой энергии. Цитоплазма занимает основной объем бактери-

альной клетки и состоит из растворимых белков, рибонуклеиновых кислот, включений и многочисленных мелких гранул — рибосом, ответственных за синтез (трансляцию) белков.

*Рибосомы* бактерий имеют размер около 20 нм и коэффициент седиментации 70S, в отличие от 80S-рибосом, характерных для эукариотических клеток. Поэтому некоторые антибиотики, связываясь с рибосомами бактерий, подавляют синтез бактериального белка, не влияя на синтез белка эукариотических клеток. Рибосомы бактерий могут диссоциировать на две субъединицы: 50S и 30S. рРНК — консервативные элементы бактерий («молекулярные часы» эволюции). 16S-рРНК входит в состав малой субъединицы рибосом, а 23S-рРНК — в состав большой субъединицы рибосом. Изучение 16S рРНК является основой геносистематики, позволяя оценить степень родства организмов.

В цитоплазме имеются различные включения в виде гранул гликогена, полисахаридов, β-оксимасляной кислоты и полифосфатов (волютин). Они накапливаются при избытке питательных веществ в окружающей среде и выполняют роль запасных веществ для питания и энергетических потребностей.

*Волютин* обладает сродством к основным красителям и легко выявляется с помощью специальных методов окраски (например, по Нейссеру) в виде метахроматических гранул. Толуидиновым синим или метиленовым голубым волютин окрашивается в красно-фиолетовый цвет, а цитоплазма бактерии — в синий. Характерное расположение гранул волютина выявляется у дифтерийной палочки в виде интенсивно прокрашивающихся полюсов клетки. Метахроматическое окрашивание волютина связано с высоким содержанием полимеризованного неорганического полифосфата. При электронной микроскопии они имеют вид электронно-плотных гранул размером 0,1–1 мкм.

**Нуклеоид** — эквивалент ядра у бактерий. Он расположен в центральной зоне бактерий в виде двунитевой ДНК, плотно уложенной наподобие клубка. Нуклеоид бактерий, в отличие от эукариот, не имеет ядерной оболочки, ядрышка и основных белков (гистонов). У большинства бактерий содержится одна хромосома, представленная замкнутой в кольцо молекулой ДНК. Но у некоторых бактерий имеются две хромосомы кольцевой формы (*V. cholerae*) и линейные хромосомы (см. раздел 5.1.1). Нуклеоид выявляется в световом микроскопе после окраски специфическими для ДНК

методами: по Фельгену или по Романовскому—Гимзе. На электронограммах ультратонких срезов бактерий нуклеоид имеет вид светлых зон с фибриллярными, нитевидными структурами ДНК, связанной определенными участками с цитоплазматической мембраной или мезосомой, участвующими в репликации хромосомы.

Кроме нуклеоида, в бактериальной клетке имеются внехромосомные факторы наследственности — плазмиды (см. раздел 5.1.2), представляющие собой ковалентно замкнутые кольца ДНК.

**Капсула, микрокапсула, слизь.** *Капсула* — слизистая структура толщиной более 0,2 мкм, прочно связанная с клеточной стенкой бактерий и имеющая четко очерченные внешние границы. Капсула различима в мазках-отпечатках из патологического материала. В чистых культурах бактерий капсула образуется реже. Она выявляется при специальных методах окраски мазка по Бурри—Гинсу, создающих негативное контрастирование веществ капсулы: тушь создает темный фон вокруг капсулы. Капсула состоит из полисахаридов (экзополисахаридов), иногда из полипептидов, например у сибиреязвенной бациллы она состоит из полимеров D-глутаминовой кислоты. Капсула гидрофильна, включает большое количество воды. Она препятствует фагоцитозу бактерий. Капсула антигенна: антитела к капсуле вызывают ее увеличение (реакция набухания капсулы).

Многие бактерии образуют *микрокапсулу* — слизистое образование толщиной менее 0,2 мкм, выявляемое лишь при электронной микроскопии.

От капсулы следует отличать *слизь* — мукоидные экзополисахариды, не имеющие четких внешних границ. Слизь растворима в воде.

Мукоидные экзополисахариды характерны для мукоидных штаммов синегнойной палочки, часто встречающихся в мокроте больных кистозным фиброзом. Бактериальные экзополисахариды участвуют в адгезии (прилипании к субстратам); их еще называют гликокаликсом.

Капсула и слизь предохраняют бактерии от повреждений, высыхания, так как, являясь гидрофильными, хорошо связывают воду, препятствуют действию защитных факторов макроорганизма и бактериофагов.

**Жгутики** бактерий определяют подвижность бактериальной клетки. Жгутики представляют собой тонкие нити, берущие на-

чало от цитоплазматической мембраны, имеют большую длину, чем сама клетка. Толщина жгутиков 12—20 нм, длина 3—15 мкм. Они состоят из трех частей: спиралевидной нити, крюка и базального тельца, содержащего стержень со специальными дисками (одна пара дисков у грамположительных и две пары у грамотрицательных бактерий). Дисками жгутики прикреплены к цитоплазматической мембране и клеточной стенке. При этом создается эффект электромотора со стержнем — ротором, вращающим жгутик. В качестве источника энергии используется разность протонных потенциалов на цитоплазматической мембране. Механизм вращения обеспечивает протонная АТФ-синтетаза. Скорость вращения жгутика может достигать 100 об/с. При наличии у бактерии нескольких жгутиков они начинают синхронно вращаться, сплетаясь в единый пучок, образующий своеобразный пропеллер.

Жгутики состоят из белка — флагеллина (*flagellum* — жгутик), являющегося антигеном — так называемый Н-антиген. Субъединицы флагеллина закручены в виде спирали.

Число жгутиков у бактерий разных видов варьирует от одного (монотрих) у холерного вибриона до десятка и сотен, отходящих по периметру бактерии (перитрих), у кишечной палочки, протея и др. Лофотрихи имеют пучок жгутиков на одном из концов клетки. Амфитрихи имеют по одному жгутику или пучку жгутиков на противоположных концах клетки.

Жгутики выявляют с помощью электронной микроскопии препаратов, напыленных тяжелыми металлами, или в световом микроскопе после обработки специальными методами, основанными на протравливании и адсорбции различных веществ, приводящих к увеличению толщины жгутиков (например, после серебрения).

**Ворсинки, или пили (фимбрии)** — нитевидные образования, более тонкие и короткие (3—10 нм × 0,3—10 мкм), чем жгутики. Пили отходят от поверхности клетки и состоят из белка пилина. Известно несколько типов пилей. Пили общего типа отвечают за прикрепления к субстрату, питание и водно-солевой обмен. Они многочисленны — несколько сотен на клетку. Половые пили (1—3 на клетку) создают контакт между клетками, осуществляя между ними передачу генетической информации путем конъюгации (см. главу 5). Особый интерес представляют пили IV типа, у которых концы обладают гидрофобностью, в результате чего они закручиваются, эти пили называют еще кудряшками. Располага-

ются они по полюсам клетки. Эти пили встречаются у патогенных бактерий. Они обладают антигенными свойствами, осуществляют контакт бактерии с клеткой-хозяином, участвуют в образовании биопленки (см. главу 3). Многие пили являются рецепторами для бактериофагов.

**Споры** — своеобразная форма покоящихся бактерий с грамположительным типом строения клеточной стенки. Спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, у которых размер споры не превышает диаметр клетки, называются бациллами. Спорообразующие бактерии, у которых размер споры превышает диаметр клетки, отчего они принимают форму веретена, называются *клостридиями*, например бактерии рода *Clostridium* (от лат. *Clostridium* — веретено). Споры кислотоустойчивы, поэтому окрашиваются по методу Ауески или по методу Циля—Нельсена в красный, а вегетативная клетка — в синий цвет.

Спорообразование, форма и расположение спор в клетке (вегетативной) являются видовым свойством бактерий, что позволяет отличать их друг от друга. Форма спор бывает овальной и шаровидной, расположение в клетке — терминальное, т.е. на конце палочки (у возбудителя столбняка), субтерминальное — ближе к концу палочки (у возбудителей ботулизма, газовой гангрены) и центральное (у сибиреязвенной бациллы).

Процесс спорообразования (споруляция) проходит ряд стадий, в течение которых часть цитоплазмы и хромосома бактериальной вегетативной клетки отделяются, окружаясь врастающей цитоплазматической мембраной, — образуется проспора.

В протопласте проспоры находятся нуклеоид, белоксинтезирующая система и система получения энергии, основанная на гликолизе. Цитохромы отсутствуют даже у аэробов. Не содержится АТФ, энергия для прорастания сохраняется в форме 3-глицеринфосфата.

Проспору окружают две цитоплазматические мембраны. Слой, окружающий внутреннюю мембрану споры, называется *стенкой споры*, он состоит из пептидогликана и является главным источником клеточной стенки при прорастании споры.

Между наружной мембраной и стенкой споры формируется толстый слой, состоящий из пептидогликана, имеющего много сшивок, — *кортекс*.

Кнаружи от внешней цитоплазматической мембраны расположена *оболочка споры*, состоящая из кератиноподобных белков, со-

держащих множественные внутримолекулярные дисульфидные связи. Эта оболочка обеспечивает резистентность к химическим агентам. Споры некоторых бактерий имеют дополнительный покров — *экзоспориум* липопротеиновой природы. Таким образом формируется многослойная плохо проницаемая оболочка.

Спорообразование сопровождается интенсивным потреблением проспорой, а затем и формирующейся оболочкой споры дипиколиновой кислоты и ионов кальция. Спора приобретает термоустойчивость, которую связывают с наличием в ней дипиколината кальция.

Спора долго может сохраняться из-за наличия многослойной оболочки, дипиколината кальция, низкого содержания воды и вялых процессов метаболизма. В почве, например, возбудители сибирской язвы и столбняка могут сохраняться десятки лет.

В благоприятных условиях споры прорастают, проходя три последовательные стадии: активации, инициации, вырастания. При этом из одной споры образуется одна бактерия. Активация — это готовность к прорастанию. При температуре 60—80 °С спора активируется для прорастания. Инициация прорастания длится несколько минут. Стадия вырастания характеризуется быстрым ростом, сопровождающимся разрушением оболочки и выходом проростка.

### 2.2.3. Особенности строения спирохет, риккетсий, хламидий, актиномицет и микоплазм

**Спирохеты** — тонкие длинные извитые бактерии. Они состоят из наружной мембранной клеточной стенки, которая окружает цитоплазматический цилиндр. Поверх наружной мембраны располагается прозрачный чехол гликозаминогликановой природы. Под наружной мембранной клеточной стенки располагаются фибриллы, закручивающиеся вокруг цитоплазматического цилиндра, придавая бактериям винтообразную форму. Фибриллы прикреплены к концам клетки и направлены навстречу друг другу. Число и расположение фибрилл варьируют у разных видов. Фибриллы участвуют в передвижении спирохет, придавая клеткам вращательное, сгибательное и поступательное движение. При этом спирохеты образуют петли, завитки, изгибы, которые названы вторичными завитками. Спирохеты плохо воспринимают красители. Обычно их окрашивают по Романовскому—Гимзе или серебрением. В живом

виде спирохеты исследуют с помощью фазово-контрастной или темнопольной микроскопии.

Спирохеты представлены тремя родами, патогенными для человека: *Treponema*, *Borrelia*, *Leptospira*.

*Трепонемы* (род *Treponema*) имеют вид тонких штопорообразно закрученных нитей с 8–12 равномерными мелкими завитками. Вокруг протопласта трепонем расположены 3–4 фибриллы (жгутики). В цитоплазме имеются цитоплазматические филаменты. Патогенными представителями являются *T. pallidum* — возбудитель сифилиса, *T. pertenue* — возбудитель тропической болезни — фрамбезии. Имеются и сапрофиты — обитатели полости рта человека, ила водоемов.

*Боррелии* (род *Borrelia*), в отличие от трепонем, более длинные, имеют по 3–8 крупных завитков и 7–20 фибрилл. К ним относятся возбудитель возвратного тифа (*B. recurrentis*) и возбудители болезни Лайма (*B. burgdorferi*) и других заболеваний.

*Лептоспиры* (род *Leptospira*) имеют завитки неглубокие и частые в виде закрученной веревки. Концы этих спирохет изогнуты наподобие крючков с утолщениями на концах. Образуя вторичные завитки, они приобретают вид букв S или C; имеют две осевые фибриллы. Патогенный представитель *L. interrogans* вызывает лептоспироз при попадании в организм с водой или пищей, приводя к кровоизлияниям и желтухе.

**Риккетсии** — мелкие грамотрицательные палочковидные бактерии (0,3–2 мкм), облигатные (обязательные) внутриклеточные паразиты. Размножаются бинарным делением в цитоплазме, а некоторые в ядре инфицированных клеток. Обитают в членистоногих (вши, блохи, клещи), которые являются их хозяевами или переносчиками. Форма и размер риккетсий могут меняться (клетки неправильной формы, нитевидные) в зависимости от условий роста. Структура риккетсии не отличается от таковой грамотрицательных бактерий.

Риккетсии обладают независимым от клетки хозяина метаболизмом, однако, возможно, они получают от клетки хозяина макроэргические соединения для своего размножения. В мазках и тканях их окрашивают по Романовскому–Гимзе, по Маккиавелло–Здродовскому (риккетсии красного цвета, а инфицированные клетки — синего).

У человека риккетсии вызывают эпидемический сыпной тиф (*R. prowazekii*), клещевой риккетсиоз (*R. sibirica*), пятнистую лихорадку Скалистых гор (*R. rickettsii*) и другие риккетсиозы.

**Хламидии** — мелкие грамотрицательные бактерии шаровидной или овоидной формы. Не образуют спор, не имеют жгутиков и капсулы. Хламидии относятся к облигатным внутриклеточным паразитам. Они имеют кокковидную форму, грамотрицательны (иногда грамвариабельны).

Строение их клеточной стенки напоминает таковую грамотрицательных бактерий, хотя имеются отличия. Она не содержит типичного пептидогликана: в его составе полностью отсутствует N-ацетилмурамовая кислота. В состав клеточной стенки входит двойная наружная мембрана, которая включает липополисахарид и белки. Несмотря на отсутствие пептидогликана, клеточная стенка хламидий обладает ригидностью. Цитоплазма клетки ограничена внутренней цитоплазматической мембраной.

Основным методом выявления хламидий является окраска по Романовскому–Гимзе. Цвет окраски зависит от стадии жизненного цикла: элементарные тельца окашиваются в пурпурный цвет на фоне голубой цитоплазмы клетки, ретикулярные тельца — в голубой цвет.

Хламидии размножаются только в живых клетках: их рассматривают как энергетических паразитов; они не синтезируют АТФ и гуанозинтрифосфат (ГТФ). Вне клеток хламидии имеют мелкую сферическую форму (0,3 мкм), метаболически неактивны и называются *элементарными тельцами*. Элементарные тельца попадают в эпителиальную клетку путем эндоцитоза с формированием внутриклеточной вакуоли. Внутри клеток они увеличиваются в размере и превращаются в делящиеся *ретикулярные тельца*, образуя скопления в вакуолях (включения). Из ретикулярных телец образуются элементарные тельца, которые выходят из клеток путем экзоцитоза или лизиса клетки. Вышедшие из клетки элементарные тельца вступают в новый цикл, инфицируя другие клетки.

У человека хламидии вызывают поражения глаз (трахома, конъюнктивит), урогенитального тракта, легких и др.

**Актиномицеты** — ветвящиеся, нитевидные или палочковидные грамположительные бактерии. Свое название (от греч. *actis* — луч, *mykes* — гриб) они получили в связи с образованием в пораженных тканях друз — гранул из плотно переплетенных нитей в виде

лучей, отходящих от центра и заканчивающихся колбовидными утолщениями. Актиномицеты, как и грибы, образуют мицелий — нитевидные переплетающиеся клетки (гифы). Они формируют субстратный мицелий, образующийся в результате врастания клеток в питательную среду, и воздушный, растущий на поверхности среды. Актиномицеты могут делиться путем фрагментации мицелия на клетки, похожие на палочковидные и кокковидные бактерии. На воздушных гифах актиномицетов образуются споры, служащие для размножения. Споры актиномицетов обычно не термостойки.

Общую филогенетическую ветвь с актиномицетами образуют так называемые нокардиоподобные (нокардиоформные) актиномицеты — собирательная группа палочковидных бактерий неправильной формы. Их отдельные представители образуют ветвящиеся формы. К ним относят бактерии родов *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, *Nocardia* и др. Нокардиоподобные актиномицеты отличаются наличием в клеточной стенке сахаров арабинозы, галактозы, а также миколовых кислот и больших количеств жирных кислот. Миколовые кислоты и липиды клеточных стенок обусловливают кислотоустойчивость бактерий, в частности микобактерий туберкулеза и лепры (при окраске по Цилю−Нельсену они имеют красный цвет, а некислотоустойчивые бактерии и элементы ткани, мокроты — синий цвет).

Патогенные актиномицеты вызывают актиномикоз, нокардии — нокардиоз, микобактерии — туберкулез и лепру, коринебактерии — дифтерию. Сапрофитные формы актиномицетов и нокардиоподобных актиномицетов широко распространены в почве, многие из них являются продуцентами антибиотиков.

**Микоплазмы** — мелкие бактерии (0,15−1 мкм), окруженные только цитоплазматической мембраной, содержащей стеролы. Они относятся к классу *Mollicutes*. Из-за отсутствия клеточной стенки микоплазмы осмотически чувствительны. Имеют разнообразную форму: кокковидную, нитевидную, колбовидную. Эти формы видны при фазово-контрастной микроскопии чистых культур микоплазм. На плотной питательной среде микоплазмы образуют колонии, напоминающие яичницу-глазунью: центральная непрозрачная часть, погруженная в среду, и просвечивающая периферия в виде круга.

Микоплазмы вызывают у человека атипичную пневмонию (*Mycoplasma pneumoniae*) и поражения мочеполового тракта

(M. *hominis* и др.). Микоплазмы вызывают заболевания не только у животных, но и у растений. Достаточно широко распространены и непатогенные представители.

## 2.3. Строение и классификация грибов

Грибы относятся к домену *Eukarya*, царству *Fungi* (*Mycota*, *Mycetes*). Недавно грибы и простейшие были разделены на самостоятельные царства: царство *Eumycota* (настоящие грибы), царство *Chromista* и царство *Protozoa*. Некоторые микроорганизмы, ранее считавшиеся грибами или простейшими, были перемещены в новое царство *Chromista* (хромовики). Грибы — многоклеточные или одноклеточные нефотосинтезирующие (бесхлорофильные) эукариотические микроорганизмы с толстой клеточной стенкой. Они имеют ядро с ядерной оболочкой, цитоплазму с органеллами, цитоплазматическую мембрану и многослойную ригидную клеточную стенку, состоящую из нескольких типов полисахаридов (маннаны, глюканы, целлюлоза, хитин), а также белка, липидов и др. Некоторые грибы образуют капсулу. Цитоплазматическая мембрана содержит гликопротеины, фосфолипиды и эргостеролы (в отличие от холестерина — главного стерола тканей млекопитающих). Большинство грибов — облигатные или факультативные аэробы.

Грибы широко распространены в природе, особенно в почве. Некоторые грибы содействуют производству хлеба, сыра, молочнокислых продуктов и алкоголя. Другие грибы продуцируют антимикробные антибиотики (например, пенициллин) и иммунодепрессивные лекарства (например, циклоспорин). Грибы используют генетики и молекулярные биологи для моделирования различных процессов. Фитопатогенные грибы наносят значительный ущерб сельскому хозяйству, вызывая грибковые болезни злаковых растений и зерна. Инфекции, вызываемые грибами, называются микозами. Различают гифальные и дрожжевые грибы.

Гифальные (плесневые) грибы, или гифомицеты, состоят из тонких нитей толщиной 2−50 мкм, называемых гифами, которые сплетаются в грибницу или мицелий (плесень). Тело гриба называется талломом. Различают демациевые (пигментированные — коричневые или черные) и гиалиновые (непигментированные) гифомицеты. Гифы, врастающие в питательный субстрат, отвечают за питание гриба и называются вегетативными гифами. Гифы, ра-

стущие над поверхностью субстрата, называются вэсдушными или репродуктивными гифами (отвечают за размножнеие). Колонии из-за воздушного мицелия имеют пушистый вид.

Различают низшие и высшие грибы: гифы высших грибов разделены перегородками, или септами с отверстиям. иГифы низших грибов не имеют перегородок, представляя собо ймногоядерные клетки, называемые ценоцитными (от греч. *koeno-s* – единый, общий).

Дрожжевые грибы (дрожжи) в основном предсатвлены отдельными овальными клетками диаметром 3–15 мкм,і их колонии, в отличие от гифальных грибов, имеют компактный вид. По типу полового размножения они распределены среди всыших грибов — аскомицет и базидиомицет. При бесполом размнжении дрожжи образуют почки или делятся. Могут образовыват ъпсевдогифы и ложный мицелий (псевдомицелий) в виде цепоечк удлиненных клеток — «сарделек». Грибы, аналогичные дрожажм, но не имеющие полового способа размножения, называю тдрожжеподобными. Они размножаются только бесполым спооСбом — почкованием или делением. Понятия «дрожжеподобнеы грибы» часто идентифицируют с понятием «дрожжи».

Многие грибы обладают диморфизмом — спообностью к гифальному (мицелиальному) или дрожжеподобном ууосту в зависимости от условий культивирования. В инфицировнаном организме они растут в виде дрожжеподобных клеток (дрожежвая фаза), а на питательных средах образуют гифы и мицелий. Дмиорфизм связан с температурным фактором: при комнатной темпеатуре образуется мицелий, а при 37 °С (при температуре тела чеолвека) — дрожжеподобные клетки.

Грибы размножаются половым или бесполым способом. Половое размножение грибов происходит с образовнаием гамет, половых спор и других половых форм. Половые фомры называются телеоморфами.

Бесполое размножение грибов происходит с орбазованием соответствующих форм, называемых анаморфами. 'аТкое размножение происходит почкованием, фрагментацией гфи и бесполыми спорами. Эндогенные споры (спорангиоспоры) озсревают внутри округлой структуры — спорангия. Экзогенные сопры (конидии) формируются на кончиках плодоносящих гиф, танк азываемых конидиеносцах.

Различают разнообразые конидии. Артроконидии (артроспоры), или таллоконидии, образуются при равномерном септировании и расчленении гиф, а бластоконидии образуются в результате почкования. Небольшие одноклеточные конидии называются микроконидиями, большие многоклеточные конидии — макроконидиями. К бесполым формам грибов относят также хламидоконидии, или хламидоспоры (толстостенные крупные покоящиеся клетки или комплекс мелких клеток).

Царство грибов *Eumycota* включает 4 типа (*Phylum*) настоящих грибов, имеющих медицинское значение: *Zygomycota*, *Ascomycota*, *Basidiomycota* и *Deiteromycota*. Не имеют медицинского значения хитридиомицеты (тип *Chytridiomycota*) — водные сапрофитные грибы, поражающие водоросли. Ранее относимые к грибам оомицеты (организмы, родственные водорослям, паразиты высших растений) теперь относят к царству *Chromista* (*Stramenopila*), типу *Oomycota*.

Различают совершенные и несовершенные грибы. Совершенные грибы имеют половой способ размножения; к ним относят зигомицеты (*Zygomycota*), аскомицеты (*Ascomycota*) и базидиомицеты (*Basidiomycota*). Несовершенные грибы имеют только бесполый способ размножения; к ним относят формальный условный тип/группу грибов — дейтеромицеты (*Deiteromycota*).

Зигомицеты относятся к низшим грибам (мицелий несептированный). Они включают представителей родов *Mucor*, *Rhizopus*, *Rhizomucor*, *Absidia*, *Basidiobolus*, *Conidiobolus*. Распространены в почве и воздухе. Могут вызывать зигомикоз (мукоромикоз) легких, головного мозга и других органов человека.

При бесполом размножении зигомицет на плодоносящей гифе (спорангиеносце) образуется спорангий — шаровидное утолщение с оболочкой, содержащее многочисленные спорангиоспоры (рис. 2.6, 2.7). Половое размножение у зигомицетов происходит с помощью зигоспор.

Аскомицеты (сумчатые грибы) имеют септированный мицелий (кроме одноклеточных дрожжей). Свое название они получили от основного органа плодоношения — сумки, или аска, содержащего 4 или 8 гаплоидных половых спор (аскоспор).

К аскомицетам относятся отдельные представители (телеоморфы) родов *Aspergillus* и *Penicillium*. Большинство грибов родов *Aspergillus*, *Penicillium* являются анаморфами, т.е. размножаются только беспо-

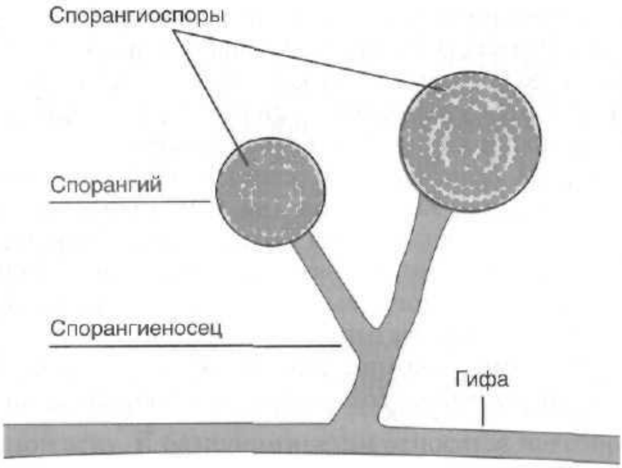



**Рис. 2.6.** Грибы рода *Mucor* (рис. А.С. Быкова)

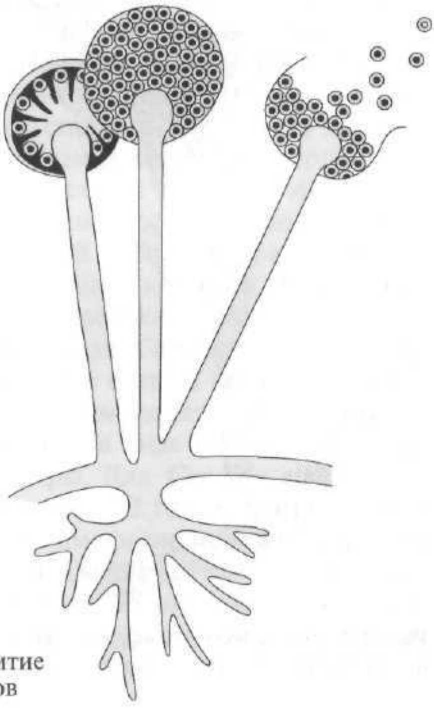


**Рис. 2.7.** Грибы рода *Rhizopus*. Развитие спорангия, спорангиоспор и ризоидов

лым путем с помощью бесполых спор — конидий (рис. 2.8, 2.9) и должны быть отнесены по этому признаку к несовершенным грибам. У грибов рода *Aspergillus* на концах плодоносящих гиф, конидиеносцах, имеются утолщения — стеригмы, фиалиды, на которых образуются цепочки конидий («леечная плесень»).

У грибов рода *Penicillium* (кистевик) плодоносящая гифа напоминает кисточку, так как из нее (на конидиеносце) образуются утолщения, разветвляющиеся на более мелкие структуры — стеригмы, фиалиды, на которых находятся цепочки конидий. Некоторые виды аспергилл могут вызывать аспергиллезы и афлатоксикозы, пенициллы могут вызывать пенициллиозы.

Представителями аскомицетов являются телеоморфы родов *Trichophyton*, *Microsporum*, *Histoplasma*, *Blastomyces*, а также дрож-

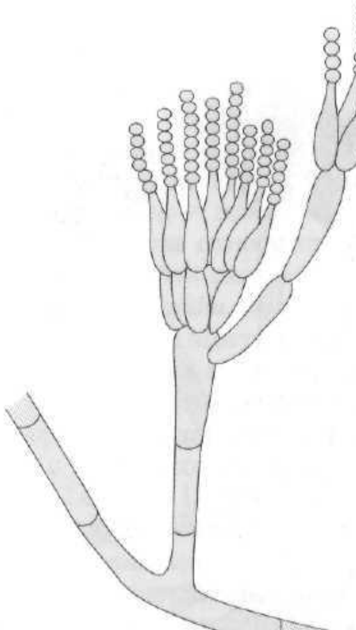


**Рис. 2.8.** Грибы рода *Penicillium*. Цепочки конидий отходят от фиалид



**Рис. 2.9.** Грибы рода *Aspergillus fumigatus*. От фиалид отходят цепочки конидий

жи (род *Saccharomyces*, телеоморфы многих видов рода *Candida*). Дрожжи — одноклеточные грибы, утратившие способность к образованию истинного мицелия; имеют овальную форму клеток диаметром 3–15 мкм. Они размножаются почкованием, бинарным делением на две равные клетки или половым путем с образованием аскоспор. Заболевания, вызываемые некоторыми видами дрожжей, получили название дрожжевых микозов. К аскомицетам относятся возбудитель пневмоцистной пневмонии *Pneumocystis* (*carinii*) *jiroveci* и возбудитель эрготизма (спорынья *Claviceps purpurea*), паразитирующий на злаках.

Базидиомицеты включают шляпочные грибы. Они имеют септированный мицелий и образуют половые споры — базидиоспоры путем отшнуровывания от базидия — концевой клетки мицелия, гомологичной аску. К базидиомицетам относятся некоторые дрожжи, например телеоморфы *Cryptococcus neoformans*.

Дейтеромицеты являются несовершенными грибами (*Fungi imperfecti*, анаморфные грибы, конидиальные грибы). Это условный, формальный таксон грибов, объединяющий грибы, не имеющие полового размножения. Недавно вместо термина «дейтеромицеты» предложен термин «митоспоровые грибы» — грибы, размножающиеся неполовыми спорами, т.е. путем митоза. При установлении факта полового размножения несовершенных грибов их переносят в один из известных типов — *Ascomycota* или *Basidiomycota*, присваивая название телеоморфной формы. Дейтеромицеты имеют септированный мицелий, размножаются только путем бесполого формирования конидий. К дейтеромицетам относятся несовершенные дрожжи (дрожжеподобные грибы), например некоторые грибы рода *Candida*, поражающие кожу, слизистые оболочки и внутренние органы (кандидоз). Они имеют овальную форму, диаметр 2–5 мкм, делятся почкованием, образуют псевдогифы (псевдомицелий) в виде цепочек из удлиненных клеток, иногда образуют гифы. Для *Candida albicans* характерно образование хламидоспор (рис. 2.10). К дейтеромицетам относят также другие грибы, не имеющие полового способа размножения, относящиеся к родам *Epidermophyton*, *Coccidioides*, *Paracoccidioides*, *Sporothrix*, *Aspergillus*, *Phialophora*, *Fonsecaea*, *Exophiala*, *Cladophialophora*, *Bipolaris*, *Exerohilum*, *Wangiella*, *Alrernaria* и др.

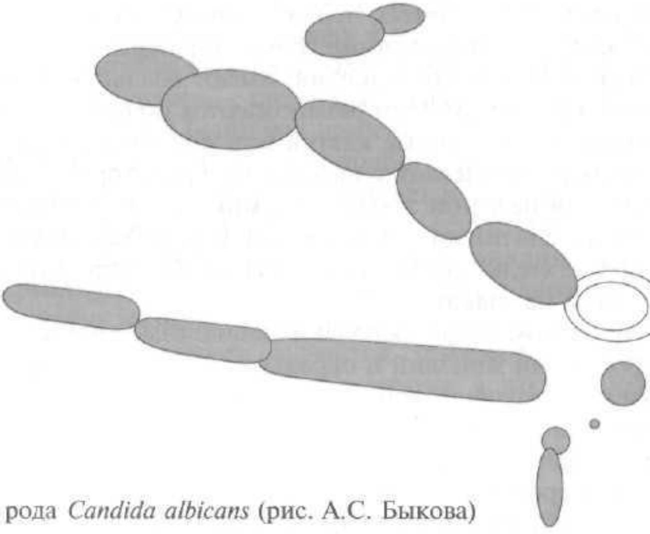


**Рис. 2.10.** Грибы рода *Candida albicans* (рис. А.С. Быкова)

## 2.4. Строение и классификация простейших

Простейшие относятся к домену *Eukarya*, царству животных (*Animalia*), подцарству *Protozoa*. Недавно предложено выделить простейшие в ранг царства *Protozoa*.

Клетка простейших окружена мембраной (пелликулой) — аналогом цитоплазматической мембраны клеток животных. Она имеет ядро с ядерной оболочкой и ядрышком, цитоплазму, содержащую эндоплазматический ретикулум, митохондрии, лизосомы и рибосомы. Размеры простейших колеблются от 2 до 100 мкм. При окраске по Романовскому–Гимзе ядро простейших имеет красный, а цитоплазма — голубой цвет. Простейшие передвигаются с помощью жгутиков, ресничек или псевдоподий, некоторые из них имеют пищеварительные и сократительные (выделительные) вакуоли. Они могут питаться в результате фагоцитоза или образования особых структур. По типу питания они разделяются на гетеротрофы и аутотрофы. Многие простейшие (дизентерийная амеба, лямблии, трихомонады, лейшмании, балантидии) могут расти на питательных средах, содержащих нативные белки и аминокислоты. Для их культивирования используют также культуры клеток, куриные эмбрионы и лабораторных животных.

Простейшие размножаются бесполым путем — двойным или множественным (шизогония) делением, а некоторые и половым путем (спорогония). Одни простейшие размножаются внеклеточно (лямблии), а другие — внутриклеточно (плазмодии, токсоплазма, лейшмании). Жизненный цикл простейших характеризуется стадийностью — образованием стадии трофозоита и стадии цисты. Цисты — покоящиеся стадии, устойчивые к изменению температуры и влажности. Кислотоустойчивостью отличаются цисты *Sarcocystis*, *Cryptosporidium* и *Isospora*.

Ранее простейшие, вызывающие заболевания у человека, были представлены 4 типами[1] (*Sarcomastigophora*, *Apicomplexa*, *Ciliophora*, *Microspora*). Эти типы недавно реклассифицированы на большее количество, появились новые царства — *Protozoa* и *Chromista* (табл. 2.2). В новое царство *Chromista* (хромовики) вошли некоторые простейшие и грибы (бластоцисты, оомицеты и *Rhinosporidium seeberi*). Царство *Protozoa* включает амебы, жгутиконосцы, споровики и реснитчатые. Они подразделены на различные типы, среди которых различают амебы, жгутиконосцы, споровики и реснитчатые.

**Таблица 2.2.** Представители царств *Protozoa* и *Chromista*, имеющие медицинское значение

| Таксоны | Представители | Болезни |
|---|---|---|
| **Царство** *Protozoa* | | |
| **Подцарство 1.** *Archezoa* | | |
| Тип *Metamonada* (кишечные жгутиконосцы) | *Lamblia intestinalis* (*Giardia lamblia*) | Диарея, мальабсорбция |
| Тип *Parabasalia*. Класс *Trichomonadea* (кишечные и родственные жгутиконосцы) | *Dientamoeba fragilis* | Диентамебиаз |
| | *Trichomonas vaginalis* | Вагинит, уретрит |

[1] Тип *Sarcomastigophora* состоял из подтипов *Sarcodina* и *Mastigophora*. Подтип *Sarcodina* (саркодовые) включал дизентерийную амебу, а подтип *Mastigophora* (жгутиконосцы) — трипаносомы, лейшмании, лямблию и трихомонады. Тип *Apicomplexa* включал класс *Sporozoa* (споровики), куда входили плазмодии малярии, токсоплазма, криптоспоридии и др. Тип *Ciliophora* включает балантидии, а тип *Microspora* — микроспоридии.

*Окончание табл. 2.2*

| Таксоны | Представители | Болезни |
|---|---|---|
| | **Подцарство 2.** *Neozoa* | |
| | **Инфрацарство 1.** *Discicristata* | |
| Тип *Euglenozoa*. Класс *Kinetoplastea* (жгутиконосцы, имеющие кинетопласт) | *Leishmania spp.* | Лейшманиозы |
| | *Trypanosoma spp.* | Трипаносомозы |
| Тип *Percolozoa*. Класс *Heterolobosea* (жгутиконосные амебы) | *Naegleria fowleri* | Амебный менингоэнцефалит |
| | **Инфрацарство 2.** *Sarcomastigota* | |
| Тип *Amoebozoa* Класс *Amoebaea* Класс *Entamoebidea* | *Acanthamoeba spp.* *Balamuthia mandrillaris* | Гранулематозный энцефалит |
| | *Entamoeba histolytica* | Амебиаз |
| | **Инфрацарство 3.** *Alveolate* | |
| Тип *Sporozoa* (споровики) Класс *Coccidea* Порядок *Eimeriida* Порядок *Piroplasmida* Порядок *Haemosporida* | *Toxoplasma gondii* *Cryptosporidium spp.* | Токсоплазмоз Криптоспородиоз |
| | *Babesia spp.* | Бабезиоз |
| | *Plasmodium spp.* | Малярия |
| Тип *Ciliophora* (реснитчатые) | *Balantidium coli* | Балантидиазная дизентерия |
| | **Царство** *Chromista* | |
| Тип *Bigyra*. Класс *Blastocystea* | *Blastocystis hominis* | Бластоцистоз |
| | **Микробы неизвестного таксономического положения** | |
| Тип *Microspora* (микроспоридии). Класс *Microsporea* | *Encephalitozoon cuniculli, E. bieneusi* | Микроспоридиоз |

К амебам относятся возбудитель амебиаза человека — амебной дизентерии (*Entamoeba histolytica*), свободно живущие и непатогенные амебы (кишечная амеба и др.). Амебы размножаются бинарно бесполым путем. Их жизненный цикл состоит из стадии трофозоита (растущая, подвижная клетка, малоустойчивая) и стадии цисты. Трофозоиты передвигаются с помощью псевдоподий, которые захватывают и погружают в цитоплазму питательные вещества. Из

трофозоита образуется циста, устойчивая к внешним факторам. Попав в кишечник, она превращается в трофозоит.

Жгутиконосцы характеризуются наличием жгутиков: у лейшманий один жгутик, у трихомонад 4 свободных жгутика и один жгутик, соединенный с короткой ундулирующей мембраной. Ими являются:

- жгутиконосцы крови и тканей (лейшмании — возбудители *лейшманиозов*; *трипаносомы — возбудители сонной болезни* и болезни Шагаса);
- жгутиконосцы кишечника (лямблия — возбудитель лямблиоза);
- жгутиконосцы мочеполового тракта (трихомонада влагалищная — возбудитель трихомоноза).

Споровики включают различные паразиты:

- кровяные паразиты (плазмодии малярии и бабезии — возбудители пироплазмоза);
- кишечные и тканевые паразиты (токсоплазма — возбудитель токсоплазмоза, криптоспоридии — возбудители криптоспоридиоза и др.).

Паразиты имеют апикальный комплекс, позволяющий паразитам проникнуть в клетку хозяина. Каждый из них имеет сложное строение и свои особенности жизненного цикла. Так, например, жизненный цикл возбудителя малярии характеризуется чередованием полового (в организме комаров *Anopheles*) и бесполого (в клетках печени и эритроцитах человека, где они размножаются путем множественного деления) размножения.

Реснитчатые представлены балантидиями, которые поражают толстую кишку человека (балантидиазная дизентерия). Балантидии имеют стадию трофозоита и цисты. Трофозоит подвижен, имеет многочисленные реснички, более тонкие и короткие, чем жгутики.

Микроорганизмы с неуточненным родством представлены микроспоридиями — многочисленными видами маленьких облигатных внутриклеточных паразитов, вызывающих у ослабленных людей диарею и поражение различных органов. Эти паразиты имеют особые споры с инфекционным материалом — спороплазмой.

## 2.5. Строение и классификация вирусов

Вирусы — мельчайшие микробы, относящиеся к царству *Virae* (от лат. *virus* — яд). Они не имеют клеточного строения и состоят

из ДНК- или РНК-генома, окруженного белками. Являясь автономными генетическими структурами и облигатными внутриклеточными паразитами, вирусы размножаются в цитоплазме или ядре клетки и не имеют собственной метаболической системы. Для них характерен особый разобщенный (дизъюнктивный) способ размножения (репродукции): в разных частях вирусинфицированной клетки синтезируются вирусные компоненты, а затем происходят их сборка и формирование вирусных частиц. Зрелая вирусная частица называется вирионом.

Структуру вирусов из-за их малых размеров изучают с помощью электронной микроскопии как вирионов, так и их ультратонких срезов. Размеры вирусов (вирионов) определяют напрямую с помощью электронной микроскопии или косвенно методом ультрафильтрации через фильтры с известным диаметром пор, методом ультрацентрифугирования. Размер вирусов колеблется от 15 до 400 нм (1 нм равен 1/1000 мкм): к маленьким вирусам, размер которых сходен с размером рибосом, относят парвовирусы и вирус полиомиелита, а к наиболее крупным — вирус натуральной оспы (350 нм). Вирусы отличаются по форме вирионов, которые имеют вид палочек (вирус табачной мозаики), пули (вирус бешенства), сферы (вирусы полиомиелита, ВИЧ), нити (филовирусы), сперматозоида (многие бактериофаги).

Вирусы поражают воображение своим разнообразием структуры и свойств. В отличие от клеточных геномов, которые содержат однородную двунитевую ДНК, вирусные геномы чрезвычайно разнообразны. Различают ДНК- и РНК-содержащие вирусы, которые гаплоидны, т.е. имеют один набор генов. Диплоидный геном имеют только ретровирусы. Геном вирусов содержит от 6 до 200 генов и представлен различными видами нуклеиновых кислот: двунитевыми, однонитевыми, линейными, кольцевыми, фрагментированными.

Среди однонитевых РНК-содержащих вирусов различают геномные плюс-нить РНК и минус-нить РНК (полярность РНК). Плюс-нить (позитивная нить) РНК этих вирусов, кроме геномной (наследственной) функции, выполняет функцию информационной, или матричной РНК (иРНК, или мРНК); она является матрицей для белкового синтеза на рибосомах инфицированной клетки. Плюс-нить РНК является инфекционной: при введении в чувствительные клетки она способна вызвать инфекционный про-

цесс. Минус-нить (негативная нить) РНК-содержащих вирусов выполняет только наследственную функцию; для синтеза белка на минус-нити РНК синтезируется комплементарная ей нить. У некоторых вирусов РНК-геном является амбиполярным (*ambisense* от греч. *амби* — с обеих сторон, двойная комплементарность), т.е. содержит плюс- и минус-сегменты РНК.

Геном вирусов может включаться в геном клетки в виде провируса, проявляя себя генетическим паразитом клетки. Нуклеиновые кислоты некоторых вирусов, например вирусов герпеса, могут находиться в цитоплазме инфицированных клеток, напоминая плазмиды. Для вирусов характерно наличие структурных и неструктурных белков. Неструктурные белки участвуют в репродукции вирусов, а структурные белки обусловливают строение вирусов. Вирусы имеют как вирусспецифические белки, так и клеточные белки, захваченные вирусом при репродукции в клетке хозяина. Липиды и полисахариды имеют в своем составе главным образом сложные вирусы.

Различают простые вирусы (например, вирус гепатита А) и сложные вирусы (например, вирусы гриппа, герпеса, коронавирусы).

Простые, или безоболочечные, вирусы имеют только нуклеиновую кислоту, связанную с белковой структурой, называемой капсидом (от лат. *capsa* — футляр). Протеины, связанные с нуклеиновой кислотой, известны как нуклеопротеины, а ассоциация вирусных протеинов капсида вируса с вирусной нуклеиновой кислотой названа нуклеокапсидом. Некоторые простые вирусы могут формировать кристаллы (например, вирус ящура).

Капсид включает повторяющиеся морфологические субъединицы — капсомеры, скомпонованные из нескольких полипептидов. Нуклеиновая кислота вириона, связываясь с капсидом, образует нуклеокапсид. Капсид защищает нуклеиновую кислоту от деградации. У простых вирусов капсид участвует в прикреплении (адсорбции) к клетке хозяина. Простые вирусы выходят из клетки в результате ее разрушения (лизиса).

Сложные, или оболочечные, вирусы (рис. 2.11), кроме капсида, имеют мембранную двойную липопротеиновую оболочку (синоним: суперкапсид, или пеплос), которая приобретается путем почкования вириона через мембрану клетки, например через плазматическую мембрану, мембрану ядра или мембрану эндоплазматического ретикулума. На оболочке вируса расположены гликопротеиновые шипы,

или шипики, пепломеры. Разрушение оболочки эфиром и другими растворителями инактивирует сложные вирусы. Под оболочкой некоторых вирусов находится матриксный белок (М-белок).

Вирионы имеют спиральный, икосаэдрический (кубический) или сложный тип симметрии капсида (нуклеокапсида). Спиральный тип симметрии обусловлен винтообразной структурой нуклеокапсида (например, у вирусов гриппа, коронавирусов): капсомеры уложены по спирали вместе с нуклеиновой кислотой. Икосаэдрический тип симметрии обусловлен образованием изометрически полого тела из капсида, содержащего вирусную нуклеиновую кислоту (например, у вируса герпеса).

Капсид и оболочка (суперкапсид) защищают вирионы от воздействия окружающей среды, обусловливают избирательное взаимодействие (адсорбцию) своими рецепторными белками с опреде-

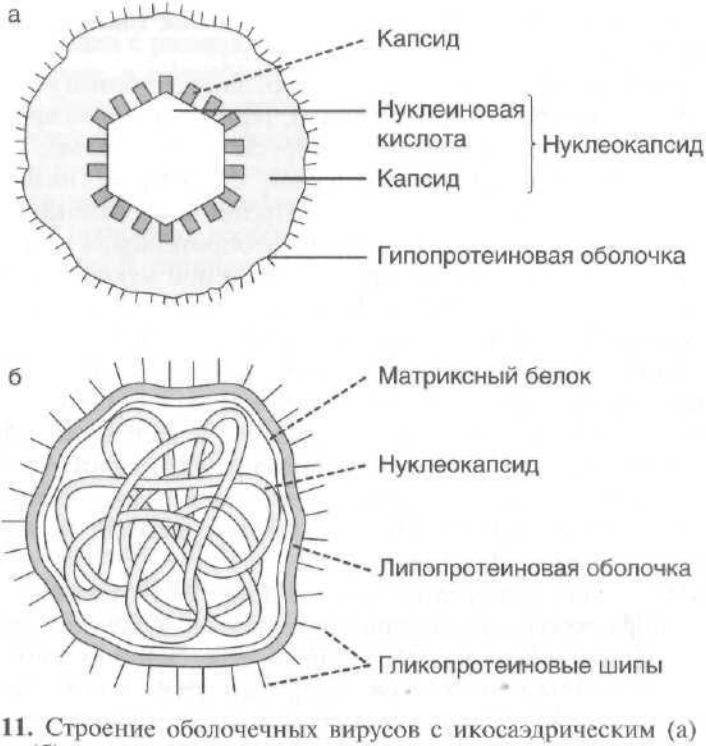



**Рис. 2.11.** Строение оболочечных вирусов с икосаэдрическим (а) и спиральным (б) капсидом

ленными клетками, а также антигенные и иммуногенные свойства вирионов.

Внутренние структуры вирусов называют сердцевиной. У аденовирусов сердцевина состоит из гистоноподобных белков, связанных с ДНК, у реовирусов — из белков внутреннего капсида.

Лауреат Нобелевской премии Д. Балтимор предложил систему балтиморской классификации, основанной на механизме синтеза мРНК. Эта классификация размещает вирусы в 7 группах (табл. 2.3). Международный комитет на таксономии вирусов (*ICTV*) принял *универсальную систему классификации, которая использует такие* таксономические категории, как семейство (название оканчивается на *viridae*), подсемейство (название оканчивается на *virinae*), род (название оканчивается на *virus*). Вид вируса не получил биноминального названия, как у бактерий. Вирусы классифицируют по типу нуклеиновой кислоты (ДНК или РНК), ее структуре и количеству нитей. *Они имеют двунитевые или однонитевые нуклеиновые* кислоты; позитивную (+), негативную (−) полярность нуклеиновой кислоты или смешанную полярность нуклеиновой кислоты, амбиполярную (+, −); линейную или циркулярную нуклеиновую кислоту; фрагментированную или нефрагментированную нуклеиновую кислоту. Учитывают также размер и морфологию вирионов, количество капсомеров и тип симметрии нуклеокапсида, наличие оболочки (суперкапсида), чувствительность к эфиру и дезоксихолату, место размножения в клетке, антигенные свойства и др.

**Таблица 2.3.** Основные вирусы, имеющие медицинское значение

| Семейство/подсемейство | Представители | Репликация генома | |
|---|---|---|---|
| | | ферменты | локализация |
| **Группа I: ДНК (двунитевые)-вирусы** | | | |
| Поксвирусы (*Poxviridae*) | Вирусы натуральной оспы, вакцины, оспы обезьян, контагиозного моллюска | Вирусная ДНК-зависимая ДНК-полимераза | Цитоплазма |
| Герпесвирусы (*Herpesviridae*) | Вирусы герпеса (типы 1, 2, 5, 6, 7, 8), Эпштейна–Барр, ветряной оспы | То же | Ядро |

*Продолжение табл. 2.3*

| Семейство/подсемейство | Представители | Репликация генома | |
|---|---|---|---|
| | | **ферменты** | **локализация** |
| Аденовирусы (*Adenoviridae*) | Аденовирусы человека | То же | Ядро |
| Папилломавирусы (*Papillomaviridae*) | Папилломавирусы человека | Клеточная ДНК-зависимая ДНК-полимераза | Ядро |
| Полиомавирусы (*Polyomaviridae*) | Полиомавирусы человека (JC, BK) | То же | Ядро |
| **Группа II: ДНК (однонитевые)-вирусы** | | | |
| Парвовирусы (*Parvoviridae*) | Парвовирус человека B19 | То же | Ядро |
| Род *Anellovirus* | TT-вирус (*TTV*), *SEN*-вирус, *TLMV* | То же | Ядро |
| **Группа III: РНК (двунитевые)-вирусы** | | | |
| Реовирусы (*Reoviridae*) | Вирусы Кемерово, колорадской клещевой лихорадки, ротавирусы человека | Вирионная РНК-зависимая РНК-полимераза | Цитоплазма |
| **Группа IV: РНК (плюс-однонитевые)-вирусы** | | | |
| Пикорнавирусы (*Picornaviridae*) | Вирусы полиомиелита, Коксаки А и В, ECHO, гепатита А, риновирусы человека | Вирусная РНК-зависимая РНК-полимераза | Цитоплазма |
| Калицивирусы (*Caliciviridae*) | Норовирусы, вирусы гастроэнтерита группы Норволк | То же | Цитоплазма |
| Гепевирусы (*Hepeviridae*) | Вирус гепатита Е | То же | Цитоплазма |
| Коронавирусы (*Coronaviridae*) | Коронавирусы человека, *SARS* (ТОРС), торовирусы | То же | Цитоплазма |
| Флавивирусы (*Flaviviridae*) | Вирусы желтой лихорадки, клещевого энцефалита, гепатита С | То же | Цитоплазма |

*Окончание табл. 2.3*

| Семейство/подсемейство | Представители | Репликация генома | |
|---|---|---|---|
| | | ферменты | локализация |
| Тогавирусы (*Togaviridae*) | Вирусы краснухи, карельской лихорадки, энцефаломиелита | То же | Цитоплазма |
| **Группа V: РНК (минус-однонитевые)-вирусы** | | | |
| Борнавирусы (*Bornaviridae*) | Вирус болезни Борна | Вирионная РНК-зависимая РНК-полимераза | Ядро |
| Филовирусы (*Filoviridae*) | Вирусы Марбург, Эбола | То же | Цитоплазма |
| Парамиксовирусы (*Paramyxoviridae*) | Вирусы кори, парагриппа, эпидемического паротита, РС | То же | Цитоплазма |
| Рабдовирусы (*Rhabdoviridae*) | Вирусы бешенства, везикулярного стоматита | То же | Цитоплазма |
| Ортомиксовирусы (*Orthomyxovirdae*) | *Influenzavirus* типы A, B, C | То же | Ядро |
| Буньявирусы (*Bunyviridae*) | Вирусы Хантаан, Крым-Конго геморрагической лихорадки | То же | Цитоплазма |
| Род *Deltavirus* | Вирус гепатита D | РНК-полимераза | Ядро |
| Аренавирусы (*Arenaviridae*) | Вирусы ЛХМ, Ласса, Гуанарито, Хунин и Мачупо | Вирионная РНК-зависимая РНК-полимераза | Цитоплазма |
| **Группа VI: РНК-вирусы (обратнотранскрибирующиеся)** | | | |
| Ретровирусы (*Retroviridae*) | Вирус иммунодефицита человека | Вирионная ревертаза | Ядро/цитоплазма |
| **Группа VII: ДНК-вирусы (обратнотранскрибирующиеся)** | | | |
| Гепаднавирусы (*Hepadnaviridae*) | Вирус гепатита В | Вирионная ревертаза | Ядро/цитоплазма |
| **Субвирусные агенты: прионы** | | | |

Вирусы поражают животных, бактерии, грибы и растения. Являясь основными возбудителями инфекционных заболеваний человека, вирусы также участвуют в процессах канцерогенеза, могут передаваться различными путями, в том числе через плаценту (вирус краснухи, цитомегаловирус и др.), поражая плод человека. Они могут приводить и к постинфекционным осложнениям — развитию миокардитов, панкреатитов, иммунодефицитов и др.

К неклеточным формам жизни, кроме вирусов, относят прионы и вироиды. Вироиды — небольшие молекулы кольцевой, суперспирализованной РНК, не содержащие белок и вызывающие заболевания растений. Патологические прионы — инфекционные белковые частицы, *вызывающие особые конформационные болезни* в результате изменения структуры нормального клеточного прионового протеина (*PrP$^{c}$*), который имеется в организме животных и человека. *PrP$^{c}$* выполняет регуляторные функции. Его кодирует нормальный прионовый ген (*PrP*-ген), расположенный в коротком плече 20-й хромосомы человека. Прионные болезни протекают по типу трансмиссивных губкообразных энцефалопатий (болезнь Крейтцфельда–Якоба, куру и др.). *При этом прионный протеин* приобретает другую, инфекционную форму, обозначаемую как *PrP$^{sc}$* (sc от *scrapie* — скрепи — прионная инфекция овец и коз). Этот инфекционный прионный протеин имеет вид фибрилл и отличается от нормального прионного протеина третичной или четвертичной структурой.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Отметьте микробы, являющиеся прокариотами:

1. Грибы.
2. Вирусы.
3. Бактерии.
4. Прионы.

**Б.** Отметьте отличительные особенности прокариотической клетки:

1. Рибосомы 70S.
2. Наличие пептидогликана в клеточной стенке.
3. Наличие митохондрий.
4. Диплоидный набор генов.

**В**. Отметьте составные компоненты пептидогликана:
1. Тейхоевые кислоты.
2. N-ацетилглюкозоамин.
3. Липополисарид.
4. Тетрапептид.

**Г**. *Отметьте особенности строения клеточной стенки грамотрицательных бактерий:*
1. Мезодиаминопимелиновая кислота.
2. Тейхоевые кислоты.
3. ЛПС.
4. Белки-порины.

**Д**. Назовите функции спор у бактерий:
1. Сохранение вида.
2. Жароустойчивость.
3. Расселение субстрата.
4. Размножение.

**Е**. Назовите облигатные внутриклеточные паразиты:
1. Риккетсии.
2. Актиномицеты.
3. Спирохеты.
4. Хламидии.

**Ж**. Назовите особенности актиномицет:
1. Имеют термолабильные споры.
2. Грамположительные бактерии.
3. Отсутствует клеточная стенка.
4. Имеют извитую форму.

**З**. Назовите особенности спирохет:
1. Грамотрицательные бактерии.
2. Имеют двигательный фибриллярный аппарат.
3. Имеют извитую форму.
4. Являются абсолютными паразитами.

**И**. Назовите простейшие, обладающие апикальным комплексом, позволяющим проникать внутрь клетки:
1. Малярийный плазмодий.
2. Амебы.
3. Токсоплазма.
4. Криптоспоридии.

**К.** Назовите отличительную особенность сложноорганизованных вирусов:

1. Два типа нуклеиновой кислоты.
2. Наличие липидной оболочки.
3. Двойной капсид.
4. Наличие неструктурных белков.

**Л.** Отметьте высшие грибы:

1. *Mucor.*
2. *Candida.*
3. *Penicillium.*
4. *Aspergillus.*

# Глава 3

# ФИЗИОЛОГИЯ МИКРОБОВ

## 3.1. Физиология бактерий

Физиология бактерий включает метаболизм бактерий, т.е. питание, получение энергии, рост и размножения бактерий, а также их взаимодействие с окружающей средой. Метаболизм бактерий лежит в основе изучения и разработки методов их культивирования, получения чистых культур и их идентификации. Выяснение физиологии патогенных и условно-патогенных бактерий важно для изучения патогенеза вызываемых ими инфекционных болезней, постановки микробиологического диагноза, лечения и профилактики инфекционных заболеваний, регуляции взаимоотношения человека с окружающей средой, а также для использования бактерий в биотехнологических процессах с целью получения биологически активных веществ.

### 3.1.1. Питание бактерий

**Химический состав бактериальной клетки**

Бактериальная клетка на 80–90% состоит из воды и только 10% приходится на долю сухого вещества. Вода в клетке находится в свободном или связанном состоянии. Она выполняет механическую роль в обеспечении тургора, участвует в гидролитических реакциях. Удаление воды из клетки путем высушивания приводит к приостановке процессов метаболизма, прекращению размножения, а для многих микроорганизмов губительно. В то же время особый способ высушивания микроорганизмов в вакууме из замороженного состояния (лиофилизация) обеспечивает сохранение жизнеспособности большинства микроорганизмов. Лиофилизация используется для приготовления проб, пригодных для длительного хранения.

В сухом веществе бактерий 52% составляют белки, 17% — углеводы, 9% — липиды, 16% — РНК, 3% — ДНК и 3% — минеральные вещества.

Белки являются ферментами, а также составной частью клетки, входят в состав цитоплазматической мембраны (ЦПМ) и ее производных, клеточной стенки, жгутиков, спор и некоторых капсул. Некоторые бактериальные белки являются антигенами и токсинами бактерий. В состав белков бактерий входят отсутствующие у человека D-аминокислоты, а также диаминопимелиновая кислота.

Углеводы представлены в бактериальной клетке в виде моно-, ди-, олигосахаров и полисахаридов, а также входят в состав комплексных соединений с белками, липидами и другими соединениями. Полисахариды входят в состав некоторых капсул, клеточной стенки; крахмал и гликоген являются запасными питательными веществами. Некоторые полисахариды принимают участие в формировании антигенов.

Липиды или жиры входят в состав ЦПМ и ее производных, клеточной стенки грамотрицательных бактерий, а также служат запасными веществами, входят в состав эндотоксина грамотрицательных бактерий, в составе ЛПС формируют антигены. В бактериальных жирах преобладают длинноцепочечные (С14–С18) насыщенные жирные кислоты и ненасыщенные жирные кислоты, содержащие одну двойную связь. Сложные липиды представлены фосфатидилинозитом, фосфатидилглицерином и фосфатидилэтаноламином. У некоторых бактерий в клетке находятся воски, эфиры миколовой кислоты. Микоплазмы — единственные представители царства *Procaryotae*, имеющие в составе ЦПМ стеролы. Остальные бактерии в составе ЦПМ и ее производных не имеют стеролов.

В бактериальной клетке присутствуют все типы РНК: иРНК, транспортная РНК (тРНК), рРНК, менее известная антисенс РНК (асРНК). Молекулы асРНК пока не обнаружены в клетках эукариот. Информация об асРНК записана в хромосоме, в так называемых антисенс-генах. АсРНК принимает активное участие в регуляции различных клеточных процессов, в том числе репликации ДНК бактерий, вирусов, плазмид и танспозонов. асРНК представляет собой короткую молекулу, комплементарную определенному участку иРНК, и, соединяясь с ней, блокирует процесс синтеза белка. При этом в клетке подобные комплексы могут накапли-

ваться, и при диссоциации асРНК и иРНК одновременно начинается синтез белка на большом числе однотипных матриц. Искусственные молекулы асРНК пытаются использовать для борьбы с бактериями за счет угнетения ими синтеза в клетке определенных жизненно важных белков.

Пуриновые и пиримидиновые нуклеотиды — это те строительные блоки, из которых синтезируются нуклеиновые кислоты. Кроме того, пуриновые и пиримидиновые нуклеотиды входят в состав многих коферментов и служат для активации и переноса аминокислот, моносахаров, органических кислот.

ДНК выполняет в бактериальной клетке наследственную функцию. Молекула ДНК построена из двух полинуклеотидных цепочек. Каждый нуклеотид состоит из азотистого основания, сахара дезоксирибозы и фосфатной группы (рис. 3.1, б). Азотистые основания представлены пуринами (аденин, гуанин) и пиримидинами (тимин, цитозин). Каждый нуклеотид обладает полярностью. У него имеется дезоксирибозный 3'-конец и фосфатный 5'-конец. Нуклеотиды соединяются в полинуклеотидную цепочку посредством фосфодиэфирных связей между 5'-концом одного нуклеотида и 3'-концом другого (рис. 3.1, а). Соединение цепей обеспечивается водородными связями между комплементарными

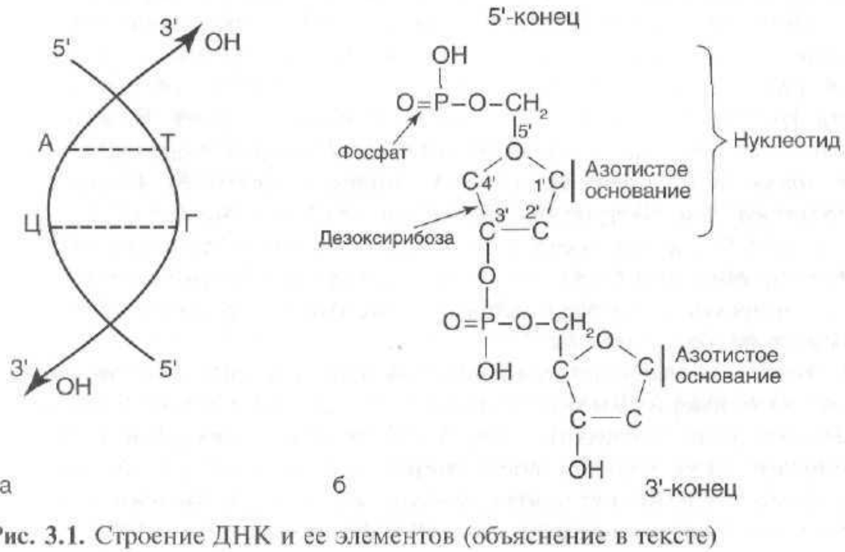



Рис. 3.1. Строение ДНК и ее элементов (объяснение в тексте)

азотистыми основаниями: аденина с тимином, гуанина с цитозином. Нуклеотидные цепи антипараллельны: на каждом из концов линейной молекулы ДНК расположены 5'-конец одной цепи и 3'-конец другой цепи. Процентное содержание ГЦ-пар в ДНК определяет степень родства между бактериями и используется при определении таксономического положения бактерий.

Минеральные вещества обнаруживаются в золе, полученной после сжигания клеток. В большом количестве представлены N, S, P, Ca, K, Mg, Fe, Mn, а также микроэлементы Zn, Cu, Co, Ba.

Азот входит в состав белков, нуклеотидов, коферментов. Сера входит в виде сульфгидрильных групп в структуру белков. Фосфор в виде фосфатов представлен в нуклеиновых кислотах, АТФ, коферментах. В качестве активаторов ферментов используются ионы Mg, Fe, Mn. Ионы K и Mg необходимы для активации рибосом. Ca является составной частью клеточной стенки грамположительных бактерий. У многих бактерий имеются сидерохромы, которые обеспечивают транспортировку ионов Fe внутрь клетки в виде растворимых комплексных соединений.

Классификация бактерий по типам питания и способам получения энергии

Основной целью метаболизма бактерий является рост, т.е. координированное увеличение всех компонентов клетки. Поскольку основными компонентами бактериальной клетки являются органические соединения, белки, углеводы, нуклеиновые кислоты и липиды, остов которых построен из атомов углерода, то для роста требуется постоянный приток атомов углерода. В зависимости от источника усвояемого углерода бактерии подразделяют на *аутотрофы* (от греч. *autos* — сам, *trophe* — питание), которые используют для построения своих клеток неорганический углерод, в виде $CO_2$, и *гетеротрофы* (от греч. *heteros* — другой), которые используют органический углерод. Легкоусвояемыми источниками органического углерода являются гексозы, многоатомные спирты, аминокислоты, липиды.

Белки, жиры, углеводы и нуклеиновые кислоты являются крупными полимерными молекулами, которые синтезируются из мономеров в реакциях поликонденсации, протекающих с поглощением энергии. Поэтому для восполнения своей биомассы бактериям, помимо источника углерода, требуется источник энергии. Энергия запасается бактериальной клеткой в форме молекул АТФ.

Организмы, для которых источником энергии является свет, называются *фототрофами.* Те организмы, которые получают энергию за счет окислительно-восстановительных реакций, называются *хемотрофами.*

Среди хемотрофов выделяют *литотрофы* (от греч. *lithos* — камень), способные использовать неорганические доноры электронов ($H_2$, $NH_3$, $H_2S$, $Fe^{2+}$ и др.) и *органотрофы,* которые используют в качестве доноров электронов органические соединения.

Бактерии, изучаемые медицинской микробиологией, являются *гетерохемоорганотрофами.* Отличительной особенностью этой группы является то, что источник углерода у них является источником энергии. Учитывая разнообразие микромира и типов метаболизма, далее изложение материала ограничено рассмотрением метаболизма у гетерохемоорганотрофов.

Степень гетеротрофности у различных бактерий неодинакова. Среди бактерий выделяют *сапрофиты* (от греч. *sapros* — гнилой, *phyton* — растение), которые питаются мертвым органическим материалом и независимы от других организмов, и *паразиты* (от греч. *parasites* — нахлебник) — гетеротрофные микроорганизмы, получающие питательные вещества от макроорганизма.

Среди паразитов различают облигатные и факультативные. *Облигатные* паразиты полностью лишены возможности жить вне клеток макроорганизма. К ним относятся представители родов *Rickettsia*, *Coxiella*, *Ehrlichia*, *Chlamydia* и др., размножающиеся только внутри клеток макроорганизма. *Факультативные* паразиты могут жить и без хозяина и размножаться, так же как и сапрофиты, на питательных средах *in vitro*, т.е. вне организма.

Культивирование бактерий в системах *in vitro* осуществляется на питательных средах. Искусственные питательные среды должны отвечать следующим требованиям.

- Каждая питательная среда должна содержать воду, так как все процессы жизнедеятельности бактерий протекают в воде.
- Для культивирования гетероорганотрофных бактерий в среде должен содержаться органический источник углерода и энергии. Эту функцию выполняют различные органические соединения: углеводы, аминокислоты, органические кислоты, липиды. Наибольшим энергетическим потенциалом обладает глюкоза, так как она непосредственно подвергается расщеплению с образованием АТФ и ингредиентов для биосинте-

тических путей. Часто используется в этих целях пептон — продукт неполного гидролиза белков, состоящий из поли-, *олиго- и дипептидов. Пептон также поставляет аминокислоты* для построения бактериальных белков.

- Для синтеза белков, нуклеотидов, АТФ, коферментов бактериям требуются источники азота, серы, фосфаты и другие минеральные вещества, в том числе микроэлементы. Источником азота может служить пептон; кроме того, большинство бактерий способны использовать соли аммония в качестве источника азота. Серу и фосфор бактерии способны утилизировать в виде неорганических солей: сульфатов и фосфатов. Для нормального функционирования ферментов бактериям требуются ионы $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Mn^{2+}$, $Fe^{2+}$, которые добавляют в питательную среду в виде солей, чаще всего фосфатов.
- Решающее значение для роста многих микроорганизмов имеет pH среды. Поддерживание определенного pH имеет значение для предотвращения гибели микроорганизмов от ими же образованных продуктов обмена.
- Среда должна обладать определенным осмотическим давлением. Большинство бактерий способны расти на изотоничных средах, изотоничность которых достигается добавлением NaCl в концентрации 0,87%. Некоторые бактерии не способны расти на средах при концентрации соли в них ниже 1%. Такие бактерии называются *галофильными*. Так как устойчивость к осмотическому давлению определяется наличием у бактерий клеточной стенки, бактерии, лишенные клеточной стенки, микоплазмы L-формы, могут расти на питательных средах, содержащих гипертонический раствор, обычно сахарозы. При необходимости к питательной среде добавляют факторы роста, ингибиторы роста определенных бактерий, субстраты для действия ферментов, индикаторы.
- Питательные среды должны быть стерильными.

В зависимости от консистенции питательные среды могут быть жидкими, полужидкими и плотными. Плотность среды достигается добавлением агара.

*Агар* — полисахарид, получаемый из водорослей. Он плавится при температуре 100 °С, но при охлаждении остывает при температуре 45—50 °С. Агар добавляют в концентрации 0,5% для полужидких сред и 1,5—2% для создания плотных сред. В зависимо-

сти от состава и цели применения различают простые, сложные, элективные, минимальные, дифференциально-диагностические и комбинированные среды.

По составу питательные среды могут быть простыми и сложными. К *простым средам* относятся пептонная вода, питательный бульон, мясопептонный агар. На основе простых сред готовят *сложные среды*, например сахарный и сывороточный бульоны, кровяной агар.

В зависимости от назначения среды подразделяются на элективные, обогащения, дифференциально-диагностические. Под *элективными* понимают среды, на которых лучше растет какой-то определенный микроорганизм. Например, щелочной агар, имеющий pH 9,0, служит для выделения холерного вибриона. Другие бактерии, в частности кишечная палочка, из-за высокого pH на этой среде не растут.

*Среды обогащения* — это среды, которые стимулируют рост какого-то определенного микроорганизма, ингибируя рост других. Например, среда, содержащая селенит натрия, стимулирует рост бактерий рода *Salmonella*, ингибируя рост кишечной палочки.

*Дифференциально-диагностические* среды служат для изучения ферментативной активности бактерий. Они состоят из простой питательной среды с добавлением субстрата, на который должен подействовать фермент, и индикатора, меняющего свой цвет в результате ферментативного превращения субстрата. Примером таких сред являются среды Гисса, используемые для изучения способности бактерий ферментировать сахара.

*Комбинированные* питательные *среды* сочетают в себе элективную среду, подавляющую рост сопутствующей флоры, и дифференциальную среду, диагностирующую ферментативную активность выделяемого микроба. Примером таких сред служат среда Плоскирева и висмут-сульфитный агар, используемые при выделении патогенных кишечных бактерий. Обе эти среды ингибируют рост кишечной палочки.

### 3.1.2. Ферменты бактерий

В основе всех метаболических реакций в бактериальной клетке лежит деятельность ферментов, которые принадлежат к 6 классам: оксиредуктазы, трансферазы, гидролазы, лигазы, лиазы, изомеразы. Ферменты, образуемые бактериальной клеткой, могут как

локализоваться внутри клетки — *эндоферменты*, так и выделяться в окружающую среду — *экзоферменты*. Экзоферменты играют большую роль в обеспечении бактериальной клетки доступными для проникновения внутрь источниками углерода и энергии. Большинство гидролаз являются экзоферментами, которые, выделяясь в окружающую среду, расщепляют крупные молекулы пептидов, полисахаридов, липидов до мономеров и димеров, способных проникнуть внутрь клетки. Ряд экзоферментов, например гиалуронидаза, коллагеназа, являются ферментами агрессии. Некоторые ферменты локализованы в периплазматическом пространстве бактериальной клетки. Они участвуют в процессах переноса веществ в бактериальную клетку. Ферментативный спектр является таксономическим признаком, характерным для семейства, рода и в некоторых случаях для видов. Поэтому определением спектра ферментативной активности пользуются при установлении таксономического положения бактерий. Наличие экзоферментов можно определить при помощи дифференциально-диагностических сред. Для идентификации бактерий разработаны специальные тест-системы, состоящие из набора дифференциально-диагностических сред.

### 3.1.3. Энергетический метаболизм

Энергия в бактериальной клетке накапливается в форме молекул АТФ. У хемоорганотрофных бактерий реакции, связанные с получением энергии в форме АТФ, — это реакции окисления—восстановления, сопряженные с реакциями фосфорилирования. Окисленный в этих реакциях углерод выделяется клеткой в виде $CO_2$. Для удаления отщепившегося в этих реакциях водорода, который находится в форме восстановленного НАД, разные бактерии используют различные возможности в зависимости от конечного акцептора водорода (или электронов, что является эквивалентным понятием). В зависимости от способа получения энергии у бактерий имеется несколько типов метаболизма: окислительный, или дыхание; бродильный, или ферментативный; смешанный. Тип метаболизма определяет не только реакции, в результате которых образуется АТФ, но и конечные продукты этих реакций, которые используются при идентификации бактерий, а также условия культивирования бактерий.

При использовании в качестве источника углерода и энергии глюкозы или других гексоз начальные этапы окисления глюкозы

являются общими, как при оксидативном, так и при бродильном метаболизме. К ним относятся пути превращения глюкозы в пируват (при использовании в качестве источника энергии отличных от глюкозы гексоз, или дисахаридов, они в результате химических превращений вступают в цепь реакций, превращающих глюкозу в пируват). Пируват, образовавшийся при расщеплении глюкозы, превращается при участии кофакторов в активированную уксусную кислоту или ацетилкоэнзим А. Последний окисляется в $CO_2$ с отщеплением водорода в цикле трикарбоновых кислот.

Цикл трикарбоновых кислот не только выполняет функцию конечного окисления питательных веществ, но и обеспечивает процессы биосинтеза многочисленными предшественниками: пируват α-кетоглутаровая, щавелевая и янтарные кислоты — для синтеза аминокислот, щавелевоуксусная — для синтеза пиримидиновых нуклеотидов, малонат — для синтеза аминокислот, пиримидиновых нуклеотидов и жиров (рис. 3.2).

*Окислительный метаболизм.* Бактерии, обладающие окислительным метаболизмом, энергию получают путем *дыхания. Дыхание* — процесс получения энергии в реакциях окисления–восстановления, сопряженных с реакциями окислительного фосфорилирования, при котором донорами электронов могут быть органические (у ор-

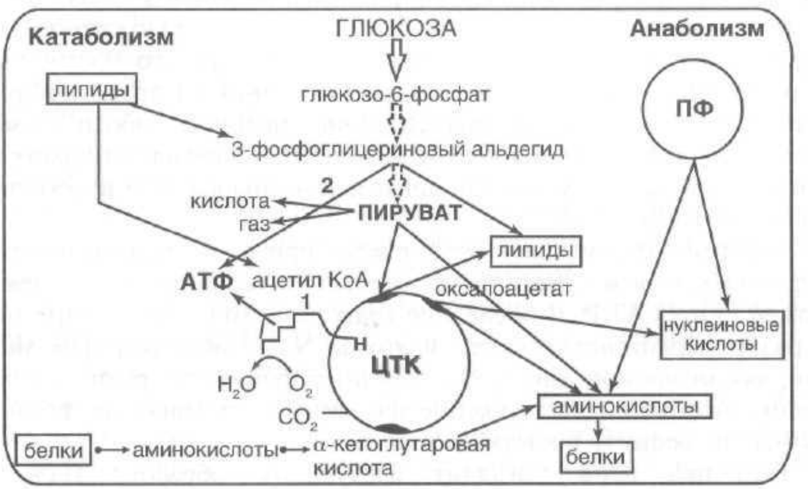



**Рис. 3.2.** Схема обмена веществ у бактерий

ганотрофов) и неорганические (у литотрофов) соединения, а акцептором — только неорганические соединения.

У бактерий, обладающих окислительным метаболизмом, акцептором электронов (или водорода [$H^+$]) является молекулярный кислород. В этом случае пируват полностью окисляется в цикле трикарбоновых кислот до $CO_2$. Цикл трикарбоновых кислот выполняет функции поставщика как предшественников для биосинтетических процессов, так и атомов водорода, который в форме восстановленного НАД переносится на молекулярный кислород через серию переносчиков, обладающих сложной структурно оформленной мультиферментной системой — *дыхательной цепью.* Дыхательная цепь у бактерий локализована в ЦПМ и во внутриклеточных мембранных структурах.

Электрохимическую энергию бактерии получают в процессе переноса электронов по окислительно-восстановительным цепям в мембране, в результате чего происходит неравномерное распределение $H^+$ по обеим ее сторонам. Переносчики электронов располагаются в мембране таким образом, что во внешней среде происходит накопление ионов водорода (при этом возникает подкисление среды), а в цитоплазме их число уменьшается, что сопровождается подщелачиванием среды. Неравномерное распределение положительно заряженных протонов (большее число на наружной и меньшее на внутренней поверхности плазматической мембраны) приводит к формированию расположенного поперек мембраны электрического поля, мембранного потенциала. В результате при переносе электронов возникает трансмембранный электрохимический градиент ионов водорода, обозначаемый символом $\Delta\mu H^+$ и измеряемый в вольтах. Энергия мембранного потенциала используется для синтеза локализованной в мембране АТФазой АТФ.

Энергия в форме $\Delta\mu H^+$ не теряется при ее запасании и может образовываться и потребляться клеткой в условиях, когда невозможен синтез АТФ. В последние годы показано, что аналогичным образом перераспределяются и атомы $Na^+$ с образованием энергии, обозначаемой как $\Delta\mu Na^+$. Данные формы энергии тратятся преимущественно на движение бактерий (у подвижных форм) и транспорт веществ в клетку и из нее.

Типичная цепь выглядит следующим образом: ЦТК $\rightarrow$ НАД($H_2$) $\rightarrow$ флавопротеид $\rightarrow$ хинон $\rightarrow$ цитохромы: b c a $\rightarrow$ $O_2$.

Конечным этапом переноса электронов (протонов) по дыхательной цепи является восстановление цитохромов а + $a_3$ (цитохромоксидазы). Цитохромоксидаза является конечной оксидазой, передающей электроны на кислород. Образующиеся при окислении ФАД или хинонов протоны связываются ионами $O^{2-}$ с образованием воды.

В то время как у эукариотов ферменты дыхательной цепи имеют относительно постоянный состав, у бактерий встречаются вариации в составе дыхательной цепи. У некоторых бактерий цитохромы отсутствуют и при контакте с кислородом происходит непосредственный перенос водорода на кислород с помощью флавопротеидов, конечным продуктом при этом оказывается перекись водорода ($H_2O_2$).

Помимо углеводов, прокариоты способны использовать другие органические соединения, в частности белки, в качестве источника энергии, окисляя их полностью до $CO_2$ и $H_2O$.

Аминокислоты и белки также могут выступать в качестве энергетических ресурсов. Их использование связано в первую очередь с определенными ферментативными преобразованиями подготовительного характера. Белки вначале вне клетки расщепляются протеолитическими ферментами на пептиды, которые поглощаются клеткой и расщепляются внутриклеточными пептидазами до аминокислот. Аминокислоты могут использоваться в конструктивном метаболизме, а могут у аммонифицирующих бактерий служить основным материалом в энергетических процессах при окислительном дезаминировании, в результате которого происходят выделение аммиака и превращение аминокислоты в кетокислоту, которая через цикл трикарбоновых кислот вступает в конструктивный метаболизм.

Процесс аммонификации известен как гниение, при этом происходит накопление продуктов, обладающих неприятным специфическим запахом образующихся при этом первичных аминов. Гнилостные бактерии осуществляют минерализацию белка, разлагая его до $CO_2$, $NH_3$, $H_2S$. К гнилостным бактериям относятся *Proteus*, *Pseudomonas*, *Bacillus cereus*.

*Анаэробное дыхание*. Некоторые бактерии обладают способностью использовать в анаэробных условиях нитрат как конечный акцептор водорода. Восстановление нитрата может происходить двумя путями: аммонификацией, при которой нитрат превращает-

ся в аммиак, и денитрофикацией, при которой происходит восстановление нитрата до молекулярного азота или закиси азота. Этот процесс связан с деятельностью фермента нитратредуктазы.

*Сульфатное дыхание.* Использовать сульфат как конечный акцептор водорода при анаэробном дыхании способна лишь небольшая группа бактерий, включающая только два рода: *Desulfovibrio, Desulfotomaculum.* Эти бактерии являются строгими анаэробами, они обитают в сероводородном иле и не имеют значения в медицинской микробиологии. Они способны использовать в качестве донора электронов молекулярный водород, поэтому их относят к хемолитотрофам. Этим бактериям принадлежит ведущая роль в образовании сероводорода в природе.

**Бродильный (ферментативный) метаболизм**. Ферментация, или брожение, — процесс получения энергии, при котором отщепленный от субстрата водород переносится на органические соединения. Кислород в процессе брожения участия не принимает. Восстановленные органические соединения выделяются в питательную среду и накапливаются в ней. Ферментироваться могут углеводы, аминокислоты (за исключением ароматических), пурины, пиримидины, многоатомные спирты. Не способны сбраживаться ароматические углеводороды, стероиды, каротиноиды, жирные кислоты. Эти вещества разлагаются и окисляются только в присутствии кислорода, в анаэробных условиях они стабильны. Продуктами брожения являются кислоты, газы, спирты.

При ферментации гексоз (глюкозы) пируват лишь частично окисляется в цикле трикарбоновых кислот. Последний выполняет только функции поставщика предшественников для биосинтетических процессов. Энергия в форме двух молекул АТФ образуется в результате субстратного фосфорилирования, протекающего при окислении триозофосфата в пируват. Отщепившийся от субстрата водород, находящийся в форме восстановленного НАД, переносится на пируват, превращая его в цепи реакций в этанол, кислоты, газы. Исходя из природы конечных продуктов, различают *несколько типов брожения углеводов: спиртовое, молочнокислое,* муравьинокислое, маслянокислое.

*Спиртовое брожение* встречается в основном у дрожжей. Конечными продуктами являются этанол и $CO_2$. Спиртовое брожение используется в хлебопекарной промышленности и виноделии.

*Молочнокислое брожение* происходит у *S. pyogenes*, *E. faecalis*, *S. Salivarius*, а также у бактерий родов *Lactobacillus* и *Bifidobacterium*. Продуктами этого типа брожения являются молочная кислота, этанол и уксусная кислота. Продукты молочнокислого брожения играют большую роль в формировании колонизационной резистентности бактериями рода *Lactobacillus* и *Bifidobacterium*, составляющих облигатную флору кишечника. Молочнокислые бактерии широко используются в молочной промышленности для получения молочнокислых продуктов, а также в создании пробиотиков.

*Муравьинокислое (смешанное) брожение* встречается у представителей семейств *Enterobacteriaceae* и *Vibrionaceae*. Различают два типа этого брожения. При первом происходит расщепление пирувата с образованием через цепь реакций муравьиной, янтарной и молочной кислот. Сильное кислотообразование можно выявить реакцией с индикатором метиленовым красным, который меняет окраску в сильнокислой среде. При втором типе брожения образуется целый ряд кислот, однако главным продуктом брожения являются ацетоин и 2,3-бутандиол, образующиеся через цепь реакций из двух молекул пирувата. Эти вещества при взаимодействии с $\alpha$-нафтолом в щелочной среде вызывают образование окраски бурого цвета, что выявляется реакцией Фогеса–Проскауэра, используемой при идентификации бактерий.

*Маслянокислое брожение*. Масляная кислота, бутанол, ацетон, изопропанол и ряд других органических кислот, в частности уксусная, капроновая, валериановая, пальмитиновая, являются продуктами сбраживания углеводов сахаролитическими строгими анаэробами. Спектр этих кислот, определяемый при помощи газожидкостной хроматографии, используется как экспресс-метод при идентификации анаэробов.

*Ферментация белков*. Если для бактерий с бродильным метаболизмом источником энергии служат белки, то такие бактерии называются пептолитическими. Пептолитическими являются некоторые клостридии, в частности С. *histolyticum* и *C. botulinum*. Пептолитические бактерии гидролизуют белки и сбраживают аминокислоты. Многие аминокислоты сбраживаются совместно с другими, при этом одна выполняет функцию донора, а другая — функцию акцептора водорода. Аминокислота-донор дезаминируется в кетокислоту, которая в результате окислительного декарбоксилирования превращается в жирную кислоту.

### 3.1.4. Конструктивный метаболизм

Основные органические компоненты бактериальной клетки, как уже было отмечено, синтезируются в реакциях полимеризации из строительных блоков: аминокислот, фосфатов, сахаров, пуриновых и пиримидиновых оснований, органических кислот. Поставщиками этих строительных блоков являются промежуточные продукты основных путей энергетического метаболизма (см. рис. 3.2). Среди бактерий выделяется группа, называющаяся *прототрофами*, которые способны синтезировать все компоненты клетки из одного источника углерода и энергии. Если бактерии теряют способность образовывать какое-либо жизненно важное вещество (аминокислоту, витамин, фактор роста и др.), участвующее в биосинтетических процессах, то для их роста и размножения требуется его поступление в готовом виде. Такие вещества называют *фактором роста*, а бактерии, возникшие, как правило, в результате мутаций, — ***ауксотрофами***.

Факторами роста являются аминокислоты, пуриновые и пиримидиновые основания, витамины, которые входят в состав простетических групп коферментов.

**Биосинтез аминокислот и синтез белка**. Большинство бактерий обладают способностью синтезировать все 20 аминокислот, из которых состоят белки. Белки в бактериальной клетке выполняют ферментативную функцию, а также являются составной частью структурных образований клетки: ЦПМ и ее производных, клеточной стенки, жгутиков, капсулы и спор у некоторых бактерий.

Углеродные скелеты аминокислот образуются из промежуточных продуктов обмена. Исходным материалом служат промежуточные продукты фруктозодифосфатного (ФДФ) и пентозофосфатного (ПФ) путей, цикл трикарбоновых кислот: пируват, кетоглутаровая кислота, оксалоацетат, фумарат, эритрозо-4-фосфат, рибозо-4-фосфат. Аминогруппы вводятся в результате непосредственного аминирования или переаминирования. Перевод неорганического азота в органические соединения происходит всегда через аммиак. Нитраты и нитриты и молекулярный азот предварительно восстанавливаются в аммиак и только лишь после этого включаются в состав органических соединений. В результате прямого аминирования образуются лишь L-аланин, L-аспартат, L-глутамат и L-глугамин. Все остальные аминокислоты получают свою аминогруппу в результате переаминирования с одной из первичных

аминокислот. Синтез белка осуществляется у бактерий так же, как в клетках эукариот.

Синтез белка происходит на рибосомах и обычно подразделяется на три процесса: *инициацию, элонгацию и терминацию*. Инициация синтеза белка заключается в связывании мет-тРНК с малой субъединицей рибосомы с последующим встраиванием инициирующего кодона иРНК. Элонгация происходит за счет поочередного присоединения аминокислотных остатков к растущей полипептидной цепи. Терминация наступает, когда синтез полипептида достигает стоп-кодона. У *E. coli* известны три таких кодона: УАА, УГА и УАГ. В результате действия факторов терминации происходят остановка синтеза белка и диссоциация молекулы иРНК и рибосомы. Скорость синтеза белка в микробной клетке очень велика, так как ДНК бактерий не отграничена мембраной от цитоплазмы, не содержит интронов (участков ДНК, не несущих информации) и соответственно у микробов отсутствуют вырезание их копий из иРНК и сшивание копий экзонов (участков, кодирующих белки). В результате в клетках прокариот не происходит физического разделения процессов синтеза иРНК (транскрипции) и трансляции, поэтому оба процесса часто идут одновременно: трансляция начинается раньше, чем завершена транскрипция. Бактерии также способны одновременно синтезировать несколько идентичных молекул на одной матрице иРНК. При этом иРНК связывается с несколькими рибосомами с образованием комплекса, получившего название «полисомы».

Процесс синтеза белка представляет собой важную мишень для разнообразных антимикробных препаратов. При этом антибиотики имеют различные мишени и механизмы действия, например аминогликозиды и тетрациклины соединяются с малой, а макролиды и линкозамиды — с большой субъединицей рибосом. Белки, синтезируемые клеткой, могут использоваться внутри нее или выделяться в окружающую среду или периплазматическое пространство (грамотрицательные бактерии).

Многие годы считали, что после синтеза на рибосомах молекулы белков сами приобретают нужную форму (третичную структуру). Сейчас мы знаем, что большинство из них приобретают нужную конформацию молекулы с помощью специальных белков, получивших название *шаперонов*. Молекулы шаперонов не только обеспечивают правильное складывание белков, но и препятствуют неправильному их закручиванию. Эти молекулы абсолютно не-

обходимы для поддержания нормальной жизнедеятельности клетки как эу-, так и прокариот. Процесс укладки белковых молекул является энергетически зависимым и сопровождается расходом энергии АТФ. Количество шаперонов резко возрастает, когда клетка подвергается стрессорному воздействию различных факторов внешней среды (температуры — тепловой шок, токсинов, нарушающих метаболические реакции и др.) При этом шапероны защищают многие белки, включая ДНК-полимеразы от разрушения. Еще одной важной функцией шаперонов является их участие в транспорте белков через мембраны.

**Биосинтез нуклеотидов**. Пуриновые и пиримидиновые нуклеотиды — это те строительные блоки, из которых синтезируются нуклеиновые кислоты. Кроме того, пуриновые и пиримидиновые нуклеотиды входят в состав многих коферментов и служат для активации и переноса аминокислот, сахаров, липидов в реакциях полимеризации. Исходным соединением для образования пентозной части нуклеотидов служит рибозо-5-фосфат, образующийся в ПФ-пути. Углеродный скелет пиримидинов происходит из аспартата, который образуется в цикле трикарбоновых кислот. Атомы азота и аминогруппы пуринов и аминосодержащих пиримидинов происходят из аспартата и глутамина.

Ключевым промежуточным продуктом для биосинтеза жирных кислот является ацетилкоэнзим А. Ключевыми промежуточными продуктами для синтеза фосфолипидов является продукт ФДФ-пути — диоксиацетилфосфат, восстанавливающийся в глицерол-3-фосфат, который соединяется с остатками жирных кислот.

**Биосинтез углеводов**. Углеводы представлены в бактериальной клетке в виде моно-, ди- и полисахаридов, а также комплексных соединений.

Синтез глюкозы происходит из пирувата за счет обратных реакций, путей распада глюкозы. Для обхода реакций, идущих только в одном направлении, имеются обходные пути, например глиоксилатный цикл.

### 3.1.5. Транспорт веществ

**Транспорт веществ в бактериальную клетку**

Для того чтобы питательные вещества могли подвергнуться превращениям в цитоплазме клетки, они должны проникнуть в клетку через пограничные слои, отделяющие клетку от окружаю-

щей среды. Ответственность за поступление в клетку питательных веществ лежит на ЦПМ.

Существует два типа переноса веществ в бактериальную клетку: пассивный и активный.

При пассивном переносе вещество проникает в клетку только по градиенту концентрации. Затрат энергии при этом не происходит. Различают две разновидности пассивного переноса: простую диффузию и облегченную диффузию. *Простая диффузия* — неспецифическое проникновение веществ в клетку, при этом решающее значение имеют величина молекул и липофильность. Скорость переноса незначительна. *Облегченная диффузия* протекает с участием белка-переносчика транслоказы. Скорость этого способа переноса зависит от концентрации вещества в наружном слое.

При активном переносе вещество проникает в клетку против градиента концентрации при помощи белка-переносчика пермеазы. При этом происходит затрата энергии. Имеется два типа активного транспорта. При первом типе активного транспорта небольшие молекулы (аминокислоты, некоторые сахара) накачиваются в клетку и создают концентрацию, которая может в 100–1000 раз превышать концентрацию этого вещества снаружи клетки. Второй механизм, получивший название *«транслокация радикалов» (фосфотрансферазный путь)*, обеспечивает включение в клетку некоторых сахаров (например, глюкозы, фруктозы), которые в процессе переноса фосфорилируются, т.е. химически модифицируются. Для осуществления этих процессов в бактериальной клетке локализуется специальная фосфотрансферная система, составной частью которой является белок-переносчик, находящийся в активной фосфорилированной форме. Фосфорилированный белок связывает свободный сахар на наружной поверхности мембраны и транспортирует его в цитоплазму, где сахар освобождается в виде фосфата. Поступив в клетку, органический источник углерода и энергии вступает в цепь биохимических реакций, в результате которых образуются АТФ и ингредиенты для биосинтетических процессов. Биосинтетические (конструктивные) и энергетические процессы протекают в клетке одновременно. Они тесно связаны между собой через общие промежуточные продукты, которые называются *амфиболитами*.

**Транспорт веществ из бактериальной клетки**

В процессе жизнедеятельности бактериям требуется выделять в окружающую среду различные белки и ферменты. Секретируемые

белки необходимы для жизнедеятельности бактерий. Они участвуют в построении клеточных оболочек, жгутиков, пилей, расщепляют крупные полимерные молекулы, используемые в качестве питательных веществ, до размеров, способных проходить через бактериальную ЦПМ; осуществляют взаимодействие с системами макроорганизма. У грамположительных микробов белки секретируются непосредственно во внешнюю среду. А у грамотрицательных бактерий они должны пересечь наружную мембрану. Наличие наружной мембраны привело к формированию у грамотрицательных бактерий различных по структуре и функциям систем секреции 5 типов.

Белки, секретируемые по I и III путям, пересекают внутреннюю цитоплазматическую и наружные мембраны в один этап без участия *sec*-белков, тогда как белки, секретируемые по II и IV путям, проходят через внутреннюю и наружную мембрану отдельными этапами при участии *sec*-белков. *Sec*-белки (транслоказы) являются небольшими белками в 30 аминокислот, которые способны узнавать сигнальную последовательность, расположенную на N-терминальном конце секретируемого белка, и связываться с ней сразу же после завершения процесса трансляции, предотвращая включение секретируемого белка в метаболизм клетки. В процессе транслокации белка, которая сопровождается поглощением энергии, происходит отщепление пептидазой в периплазматическом пространстве сигнальной последовательности, а в результате взаимодействия с шаперонами происходит формирование четвертичной структуры переносимого белка. Зрелый белок проходит через пору в наружной мембране в окружающую среду. II тип секреции является основным путем для секреции экстрацеллюлярных гидролитических ферментов у грамотрицательных бактерий. У *V. cholerae* по этому пути выделяются холерный токсин, нейраминидаза, гемагглютининпротеаза, а у *P. aeruginosa* — эластаза, фосфолипаза С.

V тип секреции отличается от II типа тем, что в периплазматическом пространстве из С-терминальной части секретируемого полипептида формируется β-цилиндрическая структура, выполняющая роль поры, через которую проходит N-терминальный конец. Внеклеточный протеолиз приводит секретируемый белок в активное функциональное состояние. По этому пути секретируются IgA-протеаза у *N. gonorrhoeae*, белок пертактин у *B. pertussis*.

I тип секреции протекает одноэтапно и требует наличия трех секреторных белков: белка, формирующего в цитоплазматической мембране пору АТФазы; белка ЦПМ, пронизывающего периплазматическое пространство; белка клеточной стенки, формирующего пору.

Транспортные белки узнают секретируемый белок по наличию сигнальной последовательности, расположенной на С-терминальном конце белка. Данным путем секретируются в основном пороформирующие токсины: гемолизин, металлопротеаза, а также внеклеточная аденилатциклаза у *B. pertussis* (рис. 3.3).

Особый интерес для медицинской микробиологии представляет III путь секреции, возникший эволюционно у грамотрицательных бактерий для транспорта из клетки компонентов жгутиков. Показано, что он используется также для направленной доставки в клетку эукариот бактериальных белков. В результате действия последних в клетке возникают различные нарушения функций, приводящие в конечном счете к возникновению у человека заболеваний. В процесс выделения молекул из клетки данным способом вовлечено более 20 различных белков. Секреторная система третьего типа (ТТСС) представляет шприцеподобную структуру (рис. 3.4), способную инъецировать эффекторные молекулы непосредственно в цитозоль клетки-хозяина. Белки ТТСС можно разделить на три группы: белки, формирующие «шприц» ТТСС; белки транслокационного комплекса, обеспечивающие транслокацию эффекторных молекул в цитоплазму клеток хозяина; эффекторные белки,

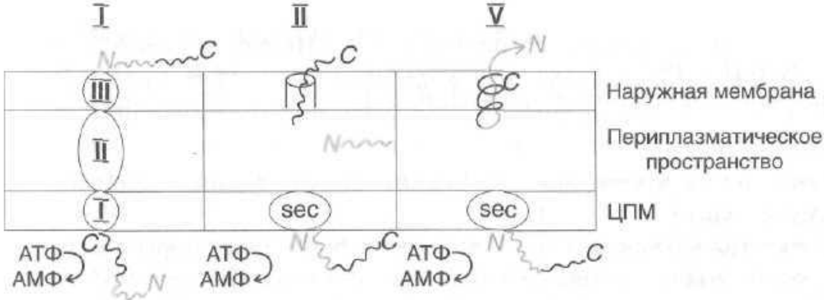



**Рис. 3.3.** Схема строения секреторных систем: I тип обеспечивает секрецию формирующих поры токсинов (гемолизина); II тип обеспечивает секрецию гидролитических ферментов, некоторых токсинов (энтеротоксин *V. cholerae*), поверхностных структур (пили 4 типа); V тип обеспечивает аутотранспорт белков у грамотрицательных бактерий

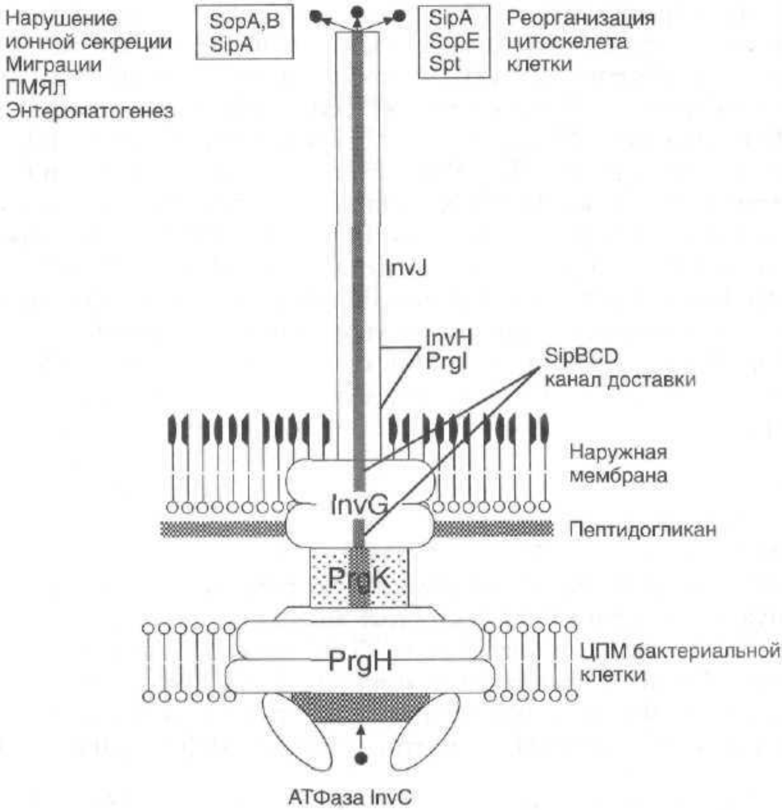



**Рис. 3.4.** Схема строения секреторной системы III типа у *Salmonella*: *PrgH*, *PrgK*, *InvG*,H,J; *PrgI* — белки, формирующие шприц; *Sip* B, C, D — белки транслокационного комплекса; *SopA*, B, E *SipA*; *Spt* — эффекторные белки

которые непосредственно оказывают модулирующее действие на клетку-хозяина.

Белки транслокационных комплексов формируют поры в мембране клетки-хозяина, создавая канал для доставки эффекторных молекул. Транслокация через сформировавшийся канал в клетку-хозяина эффекторных молекул происходит при участии белков-шоперонов.

Эффекторные белки вызывают реорганизацию цитоскелета клетки-хозяина, что способствует проникновению бактерии в клетку-хозяина, а также вызывают различные нарушения функций

клеток хозяина, приводящие в конечном счете к возникновению патологического процесса.

Экспрессия генов ТТСС регулируется различными транскрипционными регуляторами, которые интегрируют сигналы окружающей среды, такие, как осмомолярность, концентрация кислорода, pH, температура, концентрация ионов Ca. ТТСС имеется у *Salmonella*, *Shigella*, *Yersinia*, *P. aeruginosa*, *Chlamydia*, некоторых патогенных *E. coli*.

Выделение молекул из клетки также осуществляется с помощью белков-переносчиков и фосфотрансферазным путем. Одним из вариантов переносчиков можно считать белковые помпы, обеспечивающие выведение из клеток ряда антимикробных препаратов, например тетрациклинов. Фосфотрансферазный путь широко используется при выведении молекул, необходимых для построения различных структур бактерий, расположенных кнаружи от плазматической мембраны, в частности клеточной стенки, капсулы и др. Некоторые из стадий подобного транспорта подавляются используемыми в практике антимикробными препаратами, например транспорт через мембрану N-ацетилглюкозамина блокируется гликопептидным антибиотиком ванкомицином. Особым типом транспорта веществ из клеток бактерий является недавно открытая секреция мембранных пузырьков. Хотя механизм их выделения остается не совсем ясным, показано, что они могут содержать липиды, белки, нуклеиновые кислоты и полисахариды, в том числе некоторые бактериальные токсины.

### 3.1.6. Регуляция метаболизма у бактерий

Регуляция функций бактерий может приводить к появлению или исчезновению активности, а также изменению ее уровня. Эффективность клеточных регуляторных механизмов очень велика и обеспечивает максимально экономичное использование питательных веществ, предупреждают избыточный синтез промежуточных и конечных метаболитов и способствует адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды. Регуляторные процессы в клетке происходят на разных уровнях и начинаются на уровне генома. Изменение числа копий определенного гена приводит к повышению синтеза закодированного в нем белка.

Регуляция на уровне транскрипции сводится к тому, что ряд генов бактерий транскрибируется только в определенных усло-

виях. Регуляция осуществляется специальными транскрипционными факторами и *компонентами глобальной регуляторной сети*. Под ее контролем находятся ответы микробной клетки на изменения температуры и pH среды, наличие питательных веществ и двухвалентных катионов (особенно $Ca^{2+}$), фаза роста культуры. На уровне транскрипции регулируются III тип транспорта веществ из бактерий в клетку хозяина и процессы, обеспечивающие поддержание жизнедеятельности клетки в экстремальных для нее условиях. К последним относятся системы холодового и теплового шока, адаптационная система, индуцибельная система репарации ДНК (*SOS*-ответ) и др. Синтез белка этих систем начинается, когда клетка попадает в неблагоприятные условия и образование молекул иРНК других белков замедляется. Количество одного и того же фермента у бактерий в разных условиях может изменяться от 1–2 молекул на клетку до нескольких процентов от ее массы. *Известны некоторые механизмы регуляции на уровне транскрипции*, связанные с регуляторными генами. Различают негативную и позитивную регуляцию. При *позитивной регуляции* индуктор *взаимодействует с репрессором и освобождает ген-оператор*. При *негативной регуляции* происходит блокирование гена-оператора белком-репрессором.

В регуляции различных свойств бактерий в ответ на изменения условий окружающей среды принимают участие так называемые двухкомпонентные системы передачи сигнала. Основными *компонентами системы проведения сигнала* являются *сенсор*, принимающий сигнал, которым обычно является трансмембранная протеинкиназа, изменяющая свою активность под влиянием фактора окружающей среды, и расположенный в цитозоле *регулятор*, который она активирует и который, в свою очередь, влияет на экспрессию соответствующих оперонов.

Регуляция на уровне ферментов осуществляется регуляцией интенсивности ферментативных реакций. Скорость последних может регулироваться двумя основными способами: путем изменения количества ферментов и путем изменения их активности. *Биосинтетические пути*, опосредованные конститутивными ферментами, регулируются аллостерическим ингибированием активности первого фермента. Биосинтетические пути, опосредованные индуцибельными ферментами, регулируются путем репрессии их *синтеза конечным продуктом*.

*Катаболические пути,* опосредованные индуцибельными ферментами, регулируются индукцией синтеза ферментов и катаболической репрессией, а опосредованные конститутивными ферментами — посредством аллостерических воздействий на их активность. АТФ в этом случае является отрицательным эффектором, а аденозиндифосфат (АДФ) — положительным эффектором.

### 3.1.7. Морфогенез бактерий и их сообществ

Построение микробной клетки представляет собой сложный процесс, включающий не только синтез компонентов и деление. Для формирования нормальной клетки необходимо также образование всех структур, расположенных кнаружи от плазматической мембраны, т.е. клеточной стенки, жгутиков, ресничек капсулы и т.п. Морфогенез начинается с синтеза молекул-предшественниц в цитоплазме клеток. Эти молекулы представляют собой компоненты будущих внешних структур. Синтезированные молекулы различными путями переносятся через плазматическую мембрану. Компоненты пептидогликана, например, переносятся за счет фосфотрансферазного пути, некоторые белки — по II типу секреции. Компоненты жгутиков переносятся за счет специальных белков — транслоказ, являющихся компонентами III типа вывода белков из клетки. На поверхности мембраны перенесенные молекулы собираются в блоки, которые, в свою очередь, транспортируются к конечному месту своего расположения и формируют ту или иную внешнюю структуру.

Все этапы морфогенеза контролируются специфическими транспортными и связующими белками, регулируются различными внешними и внутренними факторами и являются мишенями действия ряда антимикробных препаратов. Кроме компонентов клетки, во внешнюю среду также выносятся органические молекулы, предназначенные для образования внеклеточного матрикса и поверхностной пленки, отделяющей сообщества от внешней среды. Многие стадии морфогенеза регулируются за счет активности связанных с мембраной ферментов, работа которых, в свою очередь, зависит от различных факторов, например температуры. Так, при 30 °С у мезофильных возбудителей болезней человека не образуются полноценные капсулы и капсулоподобные оболочки, реснички, функционально активные молекулы токсинов. Последние могут накапливаться в клетке или периплазме в виде

гигантских молекул — протоксинов, у которых не происходит разрезания (ограниченный протеолиз), делающего их функционально активными. Синтез самих молекул-предшественников при этом может не изменяться. Интересно, что после возвращения микроба к оптимальной температуре нормальная структура всех компонентов клетки восстанавливается обычно уже через 2–3 ч и микроб вновь становится вирулентным.

### 3.1.8. Вторичный метаболизм

Хотя бактерии и клетки животных имеют в большинстве своем сходные пути промежуточного метаболизма, ряду бактерий свойственны дополнительные реакции, в ходе которых синтезируются различные уникальные соединения. Совокупность подобных реакций получила название «вторичный метаболизм», а полученные в результате вещества — вторичные метаболиты. Наиболее характерными примерами вторичных метаболитов являются антибиотики, синтезируемые представителями ограниченного числа родов бактерий, включающего *Bacillus*, *Streptomyces* и *Nocardia*.

### 3.1.9. Отношение к факторам окружающей среды

**Отношение к температуре**

Влияние температуры на бактерии в медицинской микробиологии имеет два основных результата: возможность размножаться и сохранение жизнеспособности. В последнем случае речь идет о возможности восстановления способности к росту и размножению после пребывания при экстремальных температурах (повышенных или пониженных) для данного вида. Температурные условия на Земле различаются в широком диапазоне от 90 до 2500 °С, и всюду встречаются микробы, приспособившиеся к ним. Бактерии, вызывающие болезни людей, максимально адаптированы к температуре тела человека. В то же время некоторые из них могут жить и размножаться в окружающей среде (воде, почве, организмах различных животных), в связи с чем оптимальная температура для их роста может быть ниже или выше 37 °С.

По отношению к температуре роста бактерии принято разделять на три основные группы: психрофилы, мезофилы и термофилы. *Психрофилы* живут и размножаются при пониженных температурах (диапозон температур роста от +10 до −20 °С). При этом

строгие (облигатные) психрофилы неспособны размножаться при температуре выше 20 °С, а факультативные имеют оптимум роста от 22 до 30 °С. Именно в группе факультативных психрофилов обнаружены возбудители болезней человека (например, возбудитель чумы — *Yersinia pestis*, иерсиниоза — *Yersinia enterocolitica*, гнойно-воспалительных процессов — *Aeromonas spp.*). Бактерии, растущие при низких температурах, содержат повышенное количество ненасыщенных жирных кислот и имеют ряд особенностей структуры ферментных белков, что позволяет им расти при низких температурах. *Мезофилы* включают бактерии, температурный диапазон роста которых находится между 10 и 45 °С, а диапазон оптимальных температур роста лежит между 30 и 40 °С. Именно к этой группе относится большинство возбудителей болезней человека, оптимальный рост которых возможен при 37 °С. *Термофилы* представляют группу микробов, способных расти при повышенных температурах. Различают *термотолерантные формы*, для которых оптимальной температурой роста являются 37 °С, но возможность роста, в отличие от мезофилов, сохраняется до 60 °С. *Факультативные термофилы* проявляют максимальный рост при 50−60 °С, но также растут при 20−40 °С, в то время как *облигатные термофилы* не могут расти при температуре ниже 40 °С; оптимальная температура для их размножения 70 °С. Известны также *экстремальные термофилы*, размножающиеся при температуре выше 80 °С. Ряд микробов, являющихся экстремальными термофилами, относятся к доминиону Археи. В строении термофилов одним из важнейших факторов, обеспечивающих термоустойчивость, является структура их белков. Хотя среди термофилов пока не найдены возбудители болезней человека, продукты их жизнедеятельности используются в медицинской промышленности (протеазы, нанесенные на перевязочный материал, для инфицированных ран) и при изготовлении моющих средств (ферменты-биодобавки для очистки тканей от органических молекул).

Сохранение жизнеспособности бактерий при различных температурах зависит от строения клеток. Наиболее устойчивыми следует считать споры, выживающие в широком диапазоне температур — от минусовых до температуры кипящей воды. Вегетативные формы бактерий для выживания в условиях, несколько отличающихся от оптимальных, используют дополнительные индуцибельные генетические программы — системы холодового и теплового

шока, относящиеся к так называемым стрессовым системам. Особенности чувствительности бактерий к температуре учитываются при дезинфекции и стерилизации.

**Отношение к кислотности среды**

Одним из важных факторов, определяющих возможности жизни бактерий, является кислотность среды (концентрация ионов водорода). Большинство возбудителей болезней человека живут при pH среды от 4,0 до 9,0 с оптимумом около 7,0. Вместе с тем известны микробы, предпочитающие щелочную среду pH от 9,0 и выше (алкалофильные бактерии). К их числу можно отнести возбудитель холеры — *Vibrio cholera*. Некоторые микробы растут только в кислой среде при pH 4,0 и ниже (ацидофильные бактерии). Представители этой группы микроорганизмов используются в пищевой промышленности для получения молочнокислых продуктов. Известны микробы, устойчивые к изменениям pH среды и способные сохранять жизнеспособность как в сильнокислой, так и в сильнощелочной средах. К таким бактериям относятся возбудители туберкулеза, проказы и микобактериозов (*Mycobacterium spp*), а также актиномицеты и нокардии.

**Отношение к молекулярному кислороду**

Кислород, широко распространенный в природе, находится в свободном и связанном состоянии. В клетках он находится в связанном состоянии в составе воды и органических соединений. В атмосфере он присутствует в свободном состоянии в виде молекулярной формы, объемная доля которого составляет 21%. По отношению к кислороду, а также по использованию его в процессах получения энергии микроорганизмы подразделяются на три группы: облигатные аэробы, облигатные анаэробы, факультативные анаэробы.

**Облигатные аэробы** растут и размножаются только в присутствии кислорода, используют кислород для получении энергии путем кислородного дыхания. Энергию получают оксидативным метаболизмом, используя кислород как терминальный акцептор электронов в реакции, катализируемой цитохромоксидазой.

Облигатные аэробы подразделяются на строгие аэробы, которые растут при парциальном давлении воздуха, и микроаэрофилы, *которые, используя кислород в процессах получения энергии*, растут при его пониженном парциальном давлении. Это связано с тем, что у микроаэрофилов имеются ферменты, которые инак-

тивируются при контакте с сильными окислителями и активны только при низких значениях парциального давления кислорода, например фермент гидрогеназа.

*Облигатные анаэробы* не используют кислород для получения энергии. Тип метаболизма у них бродильный, за исключением метаболизма у двух видов бактерий: *Desulfovibrio* и *Desulfotomaculum*, которые относятся к хемолитотрофам и обладают сульфатным дыханием. Облигатные анаэробы подразделяются на две группы: строгие анаэробы и аэротолерантные. Строгие анаэробы характеризуются тем, что молекулярный кислород для них токсичен: он убивает микроорганизмы или ограничивает их рост. Энергию строгие анаэробы получают маслянокислым брожением. К строгим анаэробам относятся, например, некоторые клостридии (*C. botulinum*, *C. tetani*), бактероиды.

Аэротолерантные микроорганизмы не используют кислород для получения энергии, но могут существовать в его атмосфере. К ним относятся молочнокислые бактерии, получающие энергию гетероферментативным молочнокислым брожением.

*Факультативные анаэробы* способны расти и размножаться как в присутствии, так и при отсутствии кислорода. Они обладают смешанным типом метаболизма. Процесс получения энергии у них может происходить кислородным дыханием в присутствии кислорода, а при его отсутствии переключаться на брожение. Для этих бактерий характерно наличие анаэробного нитратного дыхания.

Различное физиологическое отношение микроорганизмов к кислороду связано с наличием у них ферментных систем, позволяющих существовать в атмосфере кислорода. Следует отметить, что в окислительных процессах, протекающих в атмосфере кислорода, при окислении флавопротеидов образуются токсичные продукты: перекись водорода $H_2O_2$ и закисный радикал кислорода $O_2^-$ — соединение, имеющее неспаренный электрон. Эти соединения вызывают перекисное окисление ненасыщенных жирных кислот и окисление *SH*-групп белков.

Для нейтрализации токсичных форм кислорода микроорганизмы, способные существовать в его атмосфере, имеют защитные механизмы. У облигатных аэробов и факультативных анаэробов накоплению закисного радикала $O_2^-$ препятствует фермент супероксиддисмутаза, расщепляющая закисный радикал на перекись

водорода и молекулярный кислород. Перекись водорода у этих бактерий разлагается ферментом каталазой на воду и молекулярный кислород.

Аэротолерантные микроорганизмы не имеют супероксиддисмутазы, и ее функцию восполняет высокая концентрация ионов марганца, который, окисляясь под действием $O_2^-$, убирает тем самым супероксидный ион. Перекись водорода у этих микроорганизмов разрушается ферментом пероксидазой в катализируемых ею реакциях окисления органических веществ.

Строгие анаэробы не имеют ни каталазы, ни пероксидазы. Однако супероксиддисмутаза встречается у многих строгих анаэробов, и наличие этого фермента коррелирует с их устойчивостью к кислороду. Некоторые строгие анаэробы (роды *Bacteroides*, *Fusobacterium*) не выносят присутствия даже незначительного количества молекулярного кислорода, тогда как некоторые представители рода *Clostridium* могут находиться в атмосфере кислорода. Для культивирования строгих анаэробов создаются условия, позволяющие удалять атмосферный кислород: использование специальных приборов, анаэростатов и анаэробных боксов, добавление в питательные среды редуцирующих кислород веществ, например тиогликолята натрия, использование поглотителей кислорода.

**Отношение к излучению**

Важнейшим естественным источником излучения для Земли является солнечная радиация. Поверхности Земли достигают преимущественно волны длиной от 300 нм и более, поскольку более короткие волны задерживаются атмосферой. Свет в диапазоне от 300 до 1000 нм, приходящийся в основном на видимый свет, оказывает заметное влияние на жизнь различных прокариотов, включая бактерии — возбудителей болезней человека. Излучение в этом диапазоне индуцирует в бактериальной клетке процессы фотореактивации, необходимые для поддержания постоянства состава ДНК и повышения выживаемости (световая репарация ДНК), а также синтез некоторых макромолекул. В медицине излучение используется для дезинфекции воздуха, различных поверхностей оборудования и материалов. Источником излучения в этом случае являются специальные лампы, получившие название бактерицидных ламп. Бактерицидное действие этих ламп связано с действием коротковолнового излучения от 220 до 300 нм. При этом излучение с длиной волны около 220 нм вызывает ионизацию молекул

кислорода с образованием озона ($O_3$). Действие коротковолнового излучения в бактериальных клетках приводит к повреждениям ДНК, сопровождающимся или появлением мутаций, или гибелью клеток и изменению и разрушению других органических макромолекул. Среди бактерий наиболее устойчивыми к действию солнечной радиации и обработке ультрафиолетовым (УФ) светом искусственного происхождения являются их споры.

*Радиоактивное излучение в естественных условиях* преимущественно связано с излучением горных пород и сильно варьирует в различных географических точках, а также городах и сельской местности. В настоящее время мало известно о роли подобной радиации в изменении свойств бактерий, актуальных для практической медицины. Искусственная радиационная обработка, используемая для лечения ряда заболеваний (прежде всего злокачественных новообразований), может изменять состав нормальной микрофлоры, что требует коррекции для профилактики различных осложнений.

### 3.1.10. Рост и размножение

Рост бактериальных клеток связан с синтезом и накоплением всех компонентов, входящих в ее состав, и увеличением размера, характерного для данного вида. В условиях, обеспечивающих рост микробов, происходит и процесс их деления. Для большинства бактерий характерно поперечное бинарное деление, приводящее к образованию двух дочерних клеток. У грамположительных бактерий при этом происходит синтез перегородки между делящимися клетками. Перегородка начинает формироваться на периферии и «движется» к центру клетки. Для грамотрицательных бактерий характерно первоначальное формирование перетяжки, отделяющей клетки. После ее образования окончательное разделение дочерних клеток сопровождается синтезом перегородки между ними.

Деление бактериальной клетки начинается спустя некоторое время после завершения цикла репликации хромосомы, которая у бактерий протекает по полуконсервативному механизму. Это означает, что каждая из двух нитей ДНК хромосомы служит матрицей для синтеза комплементарной дочерней цепи ДНК. В процессе репликации бактериальной хромосомы участвует более 20 ферментов. Перед репликацией цепи родительской молекулы матричной цепи ДНК должны быть разделены. В этом процессе участвуют фермент

хеликаза, которая в энергопоглощаемой реакции расплетает двойную спираль, и фермент топоизомераза (гираза), которая предотвращает образование вторичных завитков. *SSB-белок связывается* с одноцепочечной ДНК, предотвращая повторное скручивание в двойную спираль. В результате образуется репликативная вилка (рис. 3.5). Синтез новых цепей ДНК осуществляется ферментом ДНК-полимеразой. ДНК-полимераза не способна инициировать новые цепи ДНК, а может присоединять комплементарные матрице нуклеотиды к свободному 3'-концу растущей цепи. Поэтому для осуществления реакции полимеризации нуклеотидов на матрице родительской цепи полимеразе требуется затравка, праймер (от англ. *primer* — запал). Праймер представляет собой короткую нуклеотидную цепочку РНК, комплементарную матричной цепи, со свободным 3'-концом. Достраивание осуществляется присоединением к свободной гидроксильной группе 3'-конца затравки нового нуклеотида. Расплетенные цепи ДНК всегда содержат на 5'-конце несколько рибонуклеотидов, т.е. синтез ДНК начинается с синтеза РНК. РНК-затравку для синтеза ДНК образует специальный фермент ДНК-праймаза, способная инициировать синтез РНК по одноцепочечной ДНК матрицы при отсутствии какой-либо затравки. После того как цепь ДНК начала синтезироваться, РНК-затравка удаляется, а удаляющиеся бреши застраиваются ДНК-полимеразой с высокой точностью. Сохранение высокой

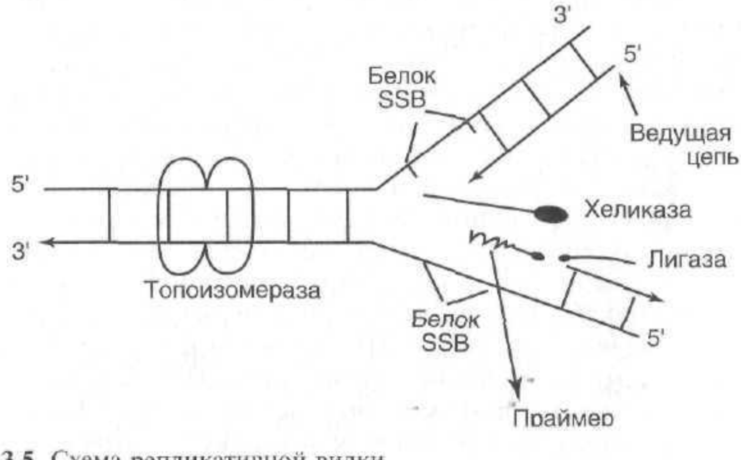



**Рис. 3.5.** Схема репликативной вилки

степени точности, необходимой при репликации, обеспечивается различными функциями ДНК-полимеразы. Кроме полимеразной активности она способна к проверке считывания. В ходе последней фермент проверяет, правильно ли осуществлено присоединение очередного нуклеотида. Если выявляется нарушение правила комплементарности, проявляется третья функция данного фермента — экзонуклеазная и происходит отщепление неправильно присоединенного нуклеотида. После его удаления вновь происходит полимеразная реакция с последующей проверкой ее правильности. В целом в благоприятных условиях синтез ДНК в клетке значительно опережает скорость ее деления. В реальных условиях одна микробная клетка содержит от 2 до 10 копий хромосом. Показано, что многие бактерии без повреждения клетки выделяют избыток ДНК в окружающую среду. Этот процесс играет важную роль в обмене генетической информацией между бактериями.

Процесс репликации ДНК бактерии продолжается до тех пор, пока не удвоится вся ДНК. Репликация начинается в одной избранной области, называемой *origin* (от англ. *origin* — начало), имеющей определенную последовательность нуклеотидов. На *origin* может возникать одна или две репликативные вилки. Последовательность нуклеотидов на *origin*-участке способствует необходимому для репликации ДНК расплетанию двойной спирали и служит местом «посадки» на ДНК комплекса ферментов, участвующих в репликации. Правильное распределение вновь синтезированных нитей ДНК по дочерним клеткам достигается у бактерий за счет прикрепления ДНК к мембране. Пространственная организация участка прикрепления и зоны роста мембраны и клеточной стенки обеспечивает автоматическое растаскивание двух копий реплицированной ДНК по дочерним клеткам. Размножение бактерий бинарным делением приводит к росту числа бактериальных клеток в геометрической прогрессии.

При внесении бактерий в питательную среду они растут и размножаются до тех пор, пока содержание какого-нибудь из необходимых компонентов среды не достигает минимума, после чего рост и размножение прекращаются. Если на протяжении всего этого времени не прибавлять питательные вещества и не удалять конечные продукты обмена, то получаем *статическую бактериальную культуру*. Статическая (периодическая) культура бактерий ведет себя как многоклеточный организм с генетическим ограничением роста. Если построить график, по оси абсцисс которого отложить

время, а по оси ординат — число клеток, то получим кривую, описывающую зависимость числа образующихся клеток от времени размножения, которая называется кривой роста (рис. 3.6).

На кривой роста бактерий в жидкой питательной среде можно различить несколько фаз, сменяющих друг друга в определенной последовательности.

- Начальная — лаг-фаза (от англ. *lag* — отставать), охватывает промежуток времени между инокуляцией (посевом бактерий) и началом размножения. Ее продолжительность в среднем 2–5 ч и зависит от состава питательной среды и возраста засеваемой культуры. Во время лаг-фазы происходит адаптация бактериальных клеток к новым условиям культивирования, идет синтез индуцибельных ферментов.
- Экспоненциальная (логарифмическая) фаза характеризуется постоянной максимальной скоростью деления клеток. Эта скорость зависит от вида бактерий и питательной среды. Время удвоения клеток называется *временем генерации,* которое варьирует от вида бактериальной культуры: у бактерий рода *Pseudomonas* оно равняется 14 мин, а у *Mycobacterium* — 24 ч. Величина клеток и содержание белка в них во время экспоненциальной фазы остаются постоянными. Бактериальная культура в этой фазе состоит из стандартных клеток.




**Рис. 3.6.** Кривая бактериального роста

- Стационарная фаза наступает тогда, когда число клеток перестает увеличиваться. Так как скорость роста зависит от концентрации питательных веществ, то при уменьшении содержания последних в питательной среде уменьшается и скорость роста. Снижение скорости роста происходит также из-за большой плотности бактериальных клеток, снижения парциального давления кислорода, накопления токсичных продуктов обмена. Продолжительность стационарной фазы составляет несколько часов и зависит от вида бактерий и особенностей их культивирования.
- Фаза отмирания наступает вследствие накопления кислых продуктов обмена или в результате аутолиза под влиянием собственных ферментов. Продолжительность этой фазы колеблется от десятка часов до нескольких недель.

Продолжительность жизни бактерий мало изучена. Известно, что мезофилы на питательной среде при комнатной температуре в условиях, когда размножение бактерий минимально, могут сохранять свою жизнеспособность в течение 1–2 лет. Очевидно, что биологическая смерть бактерий в большей степени связана с ограничением числа возможных делений. Считается, что большинство бактерий могут делиться около 50 раз, после чего клетка погибает. Механизмы гибели остаются не до конца изученными, но показано существование у бактерий генов, изменение активности которых специфически направлено на самоуничтожение клеток. Постоянное нахождение бактериальной популяции в логарифмической фазе роста наблюдается в непрерывной культуре, что достигается постепенным дозированием поступления питательных веществ, контролем плотности бактериальной суспензии и удалением метаболитов. Непрерывные бактериальные культуры используются в биотехнологических процессах.

Накопление бактериальной массы (числа бактерий) при культивировании зависит от многих факторов (качество питательных сред, посевная доза, температура выращивания, pH, наличие активирующих рост добавок и др.).

На жидких питательных средах рост и размножение бактерий проявляются в виде диффузного помутнения, образования придонного осадка или поверхностной пленки. Особенностью размножения бактерий роста *Leptospira* на жидких средах является отсутствие видимых проявлений роста.

На плотных питательных средах бактерии образуют скопление клеток — колонии, которые принято считать потомком одной клетки. Колонии различаются формой, размерами, поверхностью, прозрачностью, консистенцией и окраской. Колонии с гладкой блестящей поверхностью принято называть колониями в S-форме (от англ. *smooth* — гладкий). Колонии с матовой шероховатой поверхностью называют R-формами (от англ. *rough* — шероховатый).

Окраска колоний определяется способностью бактерий синтезировать пигменты. Пигменты различаются по цвету, химическому составу и растворимости. Пигменты предохраняют бактериальную клетку от УФ-лучей, обезвреживают токсичные кислородные радикалы, обладают антибиотическими свойствами, принимают участие в реакциях, сопутствующих фотосинтезу в фототрофных бактериях.

Вид, форма, цвет и другие особенности колоний, а также характер роста на плотных питательных средах определяются как культуральные свойства бактерий и учитываются при их идентификации.

Помимо бинарного деления, некоторые представители царства *Procaryotae* имеют иные способы размножения.

Актиномицеты могут размножаться путем фрагментации гифов. Представители семейства *Streptomycetaceae* размножаются спорами.

Микоплазмы являются полиморфными бактериями, что обусловлено особенностями их размножения. Помимо поперечного деления, если оно происходит синхронно с синтезом ДНК, микоплазмы могут размножаться почкованием. В этом случае основной морфологической репродуцирующейся единицей являются элементарные тельца сферической или овоидной формы, размножающиеся фрагментацией и почкованием.

Хламидии не обладают способностью к бинарному делению. Они проходят через цикл развития, который предусматривает существование двух форм: внеклеточных инфекционных, малых размеров *элементарных телец,* не обладающих способностью к бинарному делению, и внутриклеточного, метаболически активного, крупных размеров *ретикулярного тельца,* способного к бинарному делению. В результате бинарного деления ретикулярного тельца формируются дочерние элементарные тельца, которые выделяются из клетки.

Некоторые спирохеты, например *Treponema pallidum*, способны образовывать в неблагоприятных условиях цисты, которые, распадаясь на зерна, дают потомство новым бактериальным клеткам.

*Некультивируемые формы бактерий.* Некоторые неспорообразующие бактерии способны переживать неблагоприятные для размножения условия окружающей среды, переходя в некультивируемое состояние. В этом состоянии бактериальные клетки сохраняют свою метаболическую активность, но не способны к непрерывному клеточному делению, необходимому для роста на жидких и плотных питательных средах. При смене условий существования, в частности при попадании в организм человека или животных, клетки вновь приобретают способность к размножению и сохраняют свой патогенный потенциал. Переход в некультивируемое (покоящееся) состояние обеспечивает сохранение патогенных бактерий в межэпидемические и межэпизоотические периоды. При переходе в некультивируемую форму бактериальные клетки уменьшаются в размерах, приобретают сферическую форму, меняют вязкость ЦПМ. У них сохраняются транспорт электронов по дыхательной цепи и невысокий уровень метаболической активности. На переход в некультивируемую форму влияют температура, концентрация солей, свет, парциальное давление кислорода, содержание питательных веществ, а также метаболиты водорослей, находящихся в биоценозе с бактериями. Выявить наличие бактерий, находящихся в некультивируемой форме, можно с помощью полимеразной цепной реакции (ПЦР) (см. раздел 5.6.3) или красителей, меняющих окраску в окисленной и восстановленной формах. Возврат способности к размножению и росту находящихся в покоящейся форме клеток могут вызвать естественные факторы: простейшие, обитатели почв и водоемов, фитогормоны, выделяемые корневыми волосками растений.

### 3.1.11. Условия культивирования бактерий

Для культивирования бактерий необходимо соблюдать ряд условий.

- Наличие полноценной питательной среды. Каждая питательная среда независимо от сложности состава и цели применения (см. главу 3.1) должна обладать водной основой, органическим источником углерода и энергии, определенным pH, осмотическим давлением.
- Температура культивирования. Температура влияет на скорость размножения. Для поддержания требуемой температуры используют специальные приборы — термостаты.

- Атмосфера культивирования. Для роста и размножения строгих аэробов необходим кислород. Аэробы хорошо растут на поверхности агара на чашках Петри или в тонком верхнем слое жидкой среды. Для обеспечения роста и размножения строгих аэробов в глубинных слоях жидкой среды необходимо диффузное распределение кислорода по всему объему питательной среды. Это достигается непрерывным перемешиванием или встряхиванием питательной среды, т.е. аэрированием. Аэрирование осуществляется на специальных аппаратах — встряхивателях.

Для культивирования *факультативных анаэробов* используют те же методы, так как в присутствии кислорода у них преобладает оксидативный метаболизм над ферментацией как наиболее энергетически выгодный.

*Микроаэрофилы* размножаются при пониженном парциальном давлении кислорода. Этого можно достичь повышением парциального давления $CO_2$ в атмосфере культивирования до 1–5% против 0,03% $CO_2$ в атмосфере воздуха. Для этих же целей используют специальные $CO_2$-инкубаторы или же посевы помещают в эксикаторы, в которых устанавливают горящую свечу.

*Облигатные анаэробы* для своего роста и размножения требуют исключения доступа кислорода воздуха. Это достигается следующими мерами:

- добавлением к питательным средам редуцирующих кислород веществ: тиогликолевой и аскорбиновой кислот, цистеина, сульфидов;
- регенерацией от кислорода воздуха жидких питательных сред путем их кипячения с последующим плотным закупориванием сосудов, в которые налиты среды, резиновыми пробками;
- использованием поглотителей кислорода, щелочного пирогаллола, и других средств, помещая их в герметически закрываемые емкости газ-паки. Этот метод используется для культивирования аэротолерантных бактерий;
- механическим удалением кислорода воздуха с последующим заполнением емкости инертным газом (для этих целей используют анаэростаты и анаэробные боксы).

Для культивирования хемо- и фотоавтотрофных бактерий создается атмосфера, насыщенная $CO_2$.

- Время культивирования зависит от времени генерации. Большинство бактерий культивируют для получения видимого

роста в течение 18–48 ч. Для культивирования возбудителя коклюша требуется 5 сут, для культивирования *M. tuberculosis* — 3–4 нед.

- Освещение. Для выращивания фототрофных микроорганизмов необходим свет. Некоторые условно-патогенные микобактерии в зависимости от освещенности образуют пигмент, что используется при их идентификации.

Культивирование абсолютных внутриклеточных паразитов, бактерий, относящихся к родам *Rickettsia*, *Ehrlichia*, *Coxiella*, *Chlamydia*, осуществляют на культурах клеток или в организме животных и членистоногих, а также в куриных эмбрионах (за исключением эрлихий). Куриные эмбрионы используют также для культивирования бактерий, обладающих высоким уровнем гетеротрофности, например родов *Borrelia*, *Legionella*.

### 3.1.12. Поведение бактерий в бактериальных сообществах

*Популяция бактерий, будь то в окружающей среде или в организме хозяина*, представляет собой не совокупность отдельных клеток, а сообщество, живущее по социальным законам, члены которого общаются между собой посредством понятного им языка. В настоящее время стало известно явление, получившее название *«quorum sensing»*, или чувство кворума. «*Quorum sensing*» — это межклеточный механизм бактериального общения, предназначенный для контроля экспрессии генов в зависимости от плотности бактериальной популяции

Регуляторные системы «*quorum sensing*» обычно состоят из двух компонентов: небольшой диффундирующей сигнальной молекулы и транскрипционного активаторного белка. В грамотрицательных бактериях сигнальные молекулы называются аутоиндукторами. По типу «*quorum sensing*» регулируется широкий ряд физиологических процессов, включая биолюминесценцию, синтез антибиотиков, детерминант вирулентности, перенос конъюгативных плазмид (см. главу 5). Такой тип межклеточной коммуникации позволяет индивидуальным бактериям следить за плотностью собственной популяции в окружающей среде, будь то внешняя среда или организм хозяина, и регулировать экспрессию специфических генов. Патогенным бактериям, которые вызывают развитие заболевания, необходимо достичь критической плотности для эффективного распространения и заселения соответствующих ниш в организме

хозяина. Патогенные бактерии чувствуют необходимость экспрессии детерминант вирулентности при достижении определенной концентрации.

Социальным поведением патогенных бактерий объясняется такое важное для медицины явление, как образование *биопленок*. Биопленки представляют высокоорганизованные сообщества бактерий, необратимо прикрепленных к субстрату и друг к другу и защищенных продуцируемым этими клетками внеклеточным полимерным матриксом. Они снабжены каналами для водоснабжения, распределения питательных веществ между членами сообщества и удаления отходов жизнедеятельности. Биопленки могут быть образованы бактериями одного или нескольких видов и состоят из активно функционирующих и покоящихся (некультивируемых) клеток. Образование биопленки является одной из основных стратегий выживания бактерий в окружающей среде, поскольку в составе биопленки они защищены от антибактериальных препаратов, включая антибиотики, дезинфектанты, бактериофаги. Многие хронические инфекции, возникновение которых связано с использованием медицинского имплантированного оборудования — катетеров, протезов, искусственных клапанов сердца, обусловлены способностью бактерий расти в виде биопленок на поверхности этих устройств.

Образование биопленки начинается с прикрепления к твердой поверхности отдельной бактериальной клетки, которая выделяет полисахариды. Делящиеся затем клетки образуют микроколонию уже внутри полисахаридного матрикса. Эти микроколонии сливаются или включают в свой состав бактерии этого или другого вида, и процесс заканчивается образованием биопленки. В процессе образования биопленки важная роль принадлежит полярно расположенным пилям IV типа (рис. 3.7).

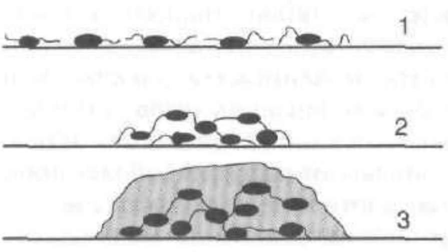



**Рис. 3.7.** Образование биопленки: 1 — прикрепление к твердой поверхности отдельных бактериальных клеток; 2 — агрегация клеток с участием пилей IV типа; 3 — *синтез экзополисахарида*

## 3.2. Физиология вирусов

Вирусы растут только внутриклеточно, т.е. являются облигатными внутриклеточными паразитами. В клетке они могут находиться в различных состояниях.

Нарушения, вызываемые вирусами, весьма разнообразны: от продуктивной инфекции с образованием вирусного потомства и гибелью клетки до продолжительного взаимодействия вируса с клеткой в виде латентной инфекции или злокачественной трансформации клетки. Инфицирование клетки вирусом может иметь следующие последствия:

- разрушение клетки (**некроз**) в результате цитоцидной инфекции, т.е. репродукция вируса приводит к цитоцидному действию (в культуре клеток происходит цитопатический эффект — клетки округляются, отделяются от соседних клеток, образуются многоядерные гигантские клетки, вакуоли и включения);
- разрушение клетки (**апоптоз**) в результате инициации вирусом програмированной клеточной гибели, при этом вирусный репликативный цикл часто прерывается;
- разрушение клетки в итоге не самим вирусом, а иммунными реакциями организма;
- вирус находится внутри клетки, но не разрушает ее (латентная инфекция);
- вирус трансформирует клетку организма в раковую клетку.

Хорошо изучены три основных типа взаимодействия вируса с клеткой: продуктивный, абортивный и интегративный.

*Продуктивный тип* взаимодействия завершается воспроизводством вирусного потомства — многочисленных вирионов и гибелью зараженных клеток (*цитоцидное действие*). Некоторые вирусы выходят из клеток, не разрушая их (*нецитоцидное действие*).

*Абортивный тип* взаимодействия не завершается образованием новых вирионов, поскольку инфекционный процесс в клетке прерывается на одном из этапов.

*Интегративный тип* взаимодействия, или вирогения, характеризуется встраиванием (интеграцией), вирусной ДНК в виде провируса в хромосому клетки и их совместной репликацией.

### 3.2.1. Продуктивный тип взаимодействия вируса с клеткой

Продуктивный тип взаимодействия вируса с клеткой, т.е. *репродукция* вируса (от лат. re — повторение, *productio* — производство), проходит несколько стадий:

1) адсорбция вириона на клеточной мембране;
2) проникновение вириона в клетку, «раздевание» и высвобождение вирусного генома (депротеинизация вируса);
3) синтез вирусных компонентов;
4) сборка реплицированной нуклеиновой кислоты и новых капсидных белков;
5) выход вирусного потомства из клетки.

**Адсорбция вириона**, т.е. его прикрепление к клеточной мембране, — первая стадия репродукции вирусов. Она происходит в результате взаимодействия поверхностных молекул (белковых лигандов) вируса с мембранными рецепторами клеток вирусов. Белки поверхности вирусов, например гликопротеины липопротеиновой оболочки, узнающие специфические клеточные рецепторы и взаимодействующие с ними, называются *прикрепительными* белками.

Лиганды вирусов и специфические рецепторы клеток имеют различную природу. Так, гемагглютининовые шипы вируса гриппа связываются с сиаловой кислотой в составе гликопротеинов и гликолипидов (ганглиозидов) клеток дыхательных путей. Гликопротеины вируса иммунодефицита человека взаимодействуют с CD4-молекулами и хемокиновыми рецепторами Т-хелперов, моноцитов и дентритных клеток. Капсидные белки вируса полиомиелита связываются с CD155-молекулой, а капсидные белки риновирусов — с *ICAM* (молекулой адгезии) клеток. На клетке находятся десятки тысяч специфических рецепторов, поэтому на ней могут адсорбироваться десятки и сотни вирионов, но проникают в клетку только определенные вирионы или их содержимое.

В основе избирательности поражения вирусами определенных клеток, тканей и органов (так называемого *тропизма*) лежат специфичность рецепторов поражаемой клетки и возможность развития в ней репродуктивного цикла вируса (пермиссивные условия клетки). Например, вирусы, репродуцирующиеся преимущественно в клетках печени, называются гепатотропными, в нервных клетках — нейротропными, в иммунокомпетентных клетках — иммунотропными и т.д.

**Проникновение вирусов** в клетку возможно в результате рецепторзависимого эндоцитоза или слияния оболочки вируса с клеточной мембраной. Возможно также сочетание этих механизмов. Рецепторзависимый эндоцитоз происходит в результате захватывания и поглощения вириона клеткой: клеточная мембрана с прикрепленным вирионом впячиваются с образованием эндосомы (внутриклеточной вакуоли). Эндоцитоз вирусов осуществляется с помощью везикул, покрытых клатрином («ямки, окаймленные клатрином»). Содержимое эндосомы закисляется, что приводит к слиянию липопротеиновой оболочки сложного вируса с мембраной эндосомы и выходу вирусного нуклеокапсида в цитозоль клетки. Эндосомы объединяются с лизосомами, которые разрушают оставшиеся вирусные компоненты. Пенетрация компонентов вируса в цитозоль обычно происходит в ранних или поздних эндосомах при уменьшенном значении pH.

Стали известны новые клатриннезависимые, альтернативные пути соединения вируса с эндосомами. Одним из них может быть макропиноцитоз с образованием крупной вакуоли, окруженной плазматической мембраной, наполненной в основном жидкостью. Другим путем попадания вируса может быть вовлечение эндоплазматического ретикулума. Этот путь начинается с формирования различных везикул (кальвеолярный эндоцитоз). Вируснесущие везикулы, сформированные в плазматической мембране, маленькие (диаметр около 70 нм). В результате проникновение вируса в цитозоль может происходить на уровне плазматической мембраны, эндосомы, кальвеосомы и эндоплазматического ретикулума.

Слияние вириона с клеточной мембраной характерно только для некоторых оболочечных вирусов (герпесвирусов, парамиксовирусов, ретровирусов), в составе которых имеются белки слияния. В результате взаимодействия вирусного белка слияния с липидами клеточной мембраны вирусная липопротеиновая оболочка интегрирует с клеточной мембраной, а внутренний компонент вируса попадает в цитозоль клетки.

Существует три варианта проникновения безоболочечных вирусов в клетку: мембранный прокол (вирион образует пору в мембране, через которую геном попадает в цитозоль, а капсид в него не попадает; перфорация (капсид переносится через мембрану без основного лизиса мембраны); лизис (вирионы индуцируют поломку мембраны цитоплазматических органелл, что способствует

проникновению вируса и его компонентов в цитозоль). Выход безоболочечных (простых) вирусов из эндосомы в цитозоль остается малоизученным.

Попав в клетку, вирусы лишаются многих белков («раздевание», или депротеинизация вирусов). В результате депротеинизации удаляются поверхностные структуры вируса и высвобождается его внутренний компонент, способный вызывать инфекционный процесс. Первые этапы «раздевания» вируса начинаются в процессе его проникновения в клетку путем слияния вирусных и клеточных мембран или же при выходе вируса из эндосомы в цитозоль. Последующие этапы «раздевания» вируса тесно взаимосвязаны с их внутриклеточным транспортом к местам депротеинизации. Для разных вирусов существуют свои специализированные участки «раздевания» в клетке: для пикорнавирусов — в цитоплазме с участием лизосом, аппарата Гольджи, для герпесвирусов — околоядерное пространство или поры ядерной мембраны, для аденовирусов — сначала структуры цитоплазмы, а затем ядро клетки. Конечными продуктами «раздевания» могут быть нуклеиновая кислота, нуклеопротеид (нуклеокапсид) или сердцевина вириона. Так, конечным продуктом «раздевания» пикорнавирусов является нуклеиновая кислота, ковалентно связанная с одним из внутренних белков. А у многих оболочечных РНК-содержащих вирусов конечными продуктами «раздевания» могут быть нуклеокапсиды или сердцевины, которые не только не препятствуют экспрессии вирусного генома, а, более того, защищают его от клеточных протеаз и регулируют последующие биосинтетические процессы.

Следующей стадией репродукции является синтез белков и нуклеиновых кислот вируса, который разобщен во времени и пространстве.

**Синтез вирусных белков**. В вирусинфицированной клетке синтезируются две группы белков: неструктурные белки, обслуживающие разные этапы репродукции вируса; структурные белки, которые входят в состав вириона (нуклеопротеины, связанные с геномом вируса, капсидные и оболочечные белки). К *неструктурным белкам* относятся: ферменты синтеза нуклеиновых кислот (РНК- или ДНК-полимеразы), обеспечивающие транскрипцию и репликацию вирусного генома; белки-регуляторы; предшественники вирусных белков, отличающиеся своей нестабильностью в результате быстрого нарезания на структурные белки; ферменты,

модифицирующие вирусные белки, например протеиназы и протеинкиназы.

Синтез белков в клетке осуществляется в соответствии с хорошо известными процессами *транскрипции* путем «переписывания» генетической информации с нуклеиновой кислоты в нуклеотидную последовательность иРНК, или мРНК, и *трансляции* — считывания иРНК на рибосомах с образованием белков. Передача наследственной информации в отношении синтеза иРНК у разных групп вирусов неодинакова.

- *ДНК-содержащие вирусы* имеют ДНК-геном, транскрибирующийся в ядре клетки с помощью клеточной РНК-полимеразы, в результате чего образуется иРНК, которая транслируется с образованием белка вируса. Особенностью этого процесса является синтез иРНК в ядре с помощью клеточной РНК-полимеразы (у аденовирусов, папилломавирусов, герпесвирусов) или в цитоплазме с помощью собственной РНК-полимеразы (у поксвирусов). Таким образом, синтез белка реализуется по схеме: геномная ДНК вируса → транскрипция иРНК → трансляция белка вируса.
- *Плюс-нитевые РНК-содержащие вирусы* (пикорнавирусы, флавивирусы, тогавирусы) имеют геном, выполняюший функцию иРНК; он распознается и транслируется рибосомами. Белки этих вирусов синтезируются без процесса транскрипции по схеме: геномная РНК вируса → трансляция белка вируса.
- *Минус-нитевые РНК-содержащие вирусы* (минус-однонитевые — ортомиксовирусы, парамиксовирусы, рабдовирусы и двунитевые — реовирусы) имеют геном, выполняющий роль матрицы, с которой транскрибируется иРНК, при участии РНК-полимеразы, связанной с нуклеиновой кислотой вируса. Синтез белка у них происходит по схеме: геномная РНК вируса → транскрипция иРНК → трансляция белка вируса.
- *Ретровирусы* (ВИЧ, онкогенные ретровирусы) имеют диплоидный геном, состоящий из двух идентичных молекул РНК. В состав ретровируса включена вирионная обратная транскриптаза, или ревертаза, с помощью которой осуществляется процесс обратной транскрипции, т.е. на матрице геномной РНК синтезируется комплементарная однонитевая ДНК. Комплементарная нить ДНК копируется с образованием двунитевой

комплементарной ДНК, которая интегрирует в клеточный геном и в его составе транскрибируется в иРНК с помощью клеточной ДНК-зависимой РНК-полимеразы. Синтез белков ретровирусов осуществляется по схеме: геномная РНК вируса → комплементарная ДНК → транскрипция иРНК → трансляция белка вируса.

**Репликация вирусных геномов**, т.е. накопление копий вирусных геномов, которые используются при сборке вирионов в клетке, отличается у вирусов, имеющих двунитевую ДНК, однонитевую ДНК, плюс-однонитевую РНК, минус-однонитевую РНК, двунитевую РНК и идентичные плюс-нитевые РНК (ретровирусы).

- *Двунитевые ДНК-вирусы.* К ним относятся вирусы, содержащие двунитевую ДНК в линейной (герпесвирусы, аденовирусы и поксвирусы) или кольцевой (папилломавирусы и полиомавирусы) форме. В репликации вирусных геномов (см. табл. 2.2) участвуют вирусные ДНК-зависимые ДНК-полимеразы (у аденовирусов, герпесвирусов и поксвирусов) или клеточные ДНК-зависимые ДНК-полимеразы (у папилломавирусов, полиомавирусов и анелловирусов). Двунитевые вирусные ДНК реплицируются обычным полуконсервативным механизмом: после расплетения нитей ДНК к ним комплементарно достраиваются новые нити. Каждая вновь синтезированная молекула ДНК состоит из одной родительской и одной вновь синтезированной нити. У всех вирусов, кроме поксвирусов, транскрипция вирусного генома происходит в ядре. Своеобразный механизм репродукции с включением процесса обратной транскрипции имеют гепаднавирусы (см. ниже).
- *Однонитевые ДНК-вирусы* представлены парвовирусами, которые используют клеточную ДНК-полимеразу для создания двунитевого вирусного генома, так называемой репликативной формы последнего. При этом на исходной вирусной ДНК (плюс-нить) комплементарно синтезируется минус-нить ДНК, служащая матрицей для синтеза плюс-нити ДНК нового вириона. Параллельно синтезируется иРНК, происходит трансляция вирусных пептидов.
- *Плюс-однонитевые РНК-вирусы* включают большую группу вирусов (*пикорнавирусы, флавивирусы, тогавирусы*), у которых геномная плюс-нить РНК выполняет функцию иРНК — матрицы для синтеза белка. На ее основе синтезируется по-

липротеин, который расщепляется на фрагменты: вирусные РНК-зависимую РНК-полимеразу, протеазы и капсидные белки. Вирусная РНК-полимераза транскрибирует геномную плюс-нить РНК в минус-нить РНК, на матрице которой синтезируется геномная плюс-нить РНК. Вирионы формируются в цитоплазме.

- *Минус-однонитевые РНК-вирусы* (аренавирусы, борнавирусы, рабдовирусы, парамиксовирусы, ортомиксовирусы, филовирусы) имеют вирионную РНК-зависимую РНК-полимеразу. Проникшая в клетку геномная минус-нить РНК трансформируется вирионной РНК-зависимой РНК-полимеразой в неполные и полные плюс-нити РНК. Неполные копии выполняют роль иРНК для синтеза вирусных белков. Полные копии являются матрицей (промежуточная стадия) для синтеза минус-нитей геномной РНК потомства. Вирионы формируются в цитоплазме.
- *Двунитевые РНК-вирусы.* Репликация этих вирусов (реовирусы и ротавирусы) сходна с репликацией минус-однонитевых РНК-вирусов. Образовавшиеся в процессе транскрипции плюс-нити РНК не только функционируют как иРНК, но и участвуют в репликации: они являются матрицами для синтеза минус-нитей РНК. Последние в комплексе с плюс-нитями РНК образуют геномные двунитевые РНК вирионов. Репликация вирусных нуклеиновых кислот этих вирусов происходит в цитоплазме клеток.
- *Вирусы с обратной транскрипцией.* К обратнотранскрибирующимся вирусам относятся представители семейств *Retroviridae* и *Hepadnaviridae.* Ретровирусы, в частности ВИЧ, являются плюс-нитевыми диплоидными РНК-содержащими вирусами. Вирионная обратная транскриптаза ретровирусов синтезирует (на матрице РНК вируса) минус-нить ДНК, с которой копируется плюс-нить ДНК с образованием двойной нити ДНК, замкнутой в кольцо. Далее двойная нить ДНК интегрирует с хромосомой клетки, образуя провирус. В результате транскрипции одной из нитей интегрированной ДНК при участии клеточной ДНК-зависимой РНК-полимеразы образуются вирионные РНК.

**Формирование вирионов**. Белки и нуклеиновые кислоты вируса синтезируются в разных частях клетки, вследствии чего этот спо-

соб репродукции вирусов получил название дисъюнктивного (от *лат. disjunctus — разобщенный*). *Синтезированные компоненты вириона* транспортируются в различные участки ядра или цитоплазмы клетки — места сборки вируса, которая происходит с участием гидрофобных, ионных, водородных связей и стерического соответствия. Формирование вирионов — многоступенчатый процесс с образованием промежуточных форм, отличающихся от зрелых вирионов по составу полипептидов. Сборка простых вирусов заключается во взаимодействии вирусных нуклеиновых кислот с капсидными белками и образовании нуклеокапсидов. У сложных вирусов сначала формируются нуклеокапсиды, которые окружаются модифицированной мембраной клетки (будущей липопротеиновой оболочкой вируса). В процессе сборки вирионов в их структуры включаются отдельные липиды и углеводы клетки-хозяина. Так, формирование вирионов в ядре клетки происходит с участием мембраны ядра, а формирование вирионов в цитоплазме — с участием мембран эндоплазматической сети или плазматической мембраны, куда встраиваются гликопротеины и другие белки оболочки вируса. У ряда сложных минус-нитевых РНК-вирусов (ортомиксовирусов, парамиксовирусов) в сборку вовлекается матриксный белок (М-белок), расположенный под модифицированной клеточной мембраной — будущей оболочкой вириона. Обладая гидрофобными свойствами, он выполняет роль посредника между нуклеокапсидом и липопротеиновой оболочкой вируса.

**Выход вирусов из клетки.** Продолжительность цикла вирусной репродукции колеблется от 6–8 ч (вирус гриппа, пикорнавирусы) до более чем 40 ч (некоторые герпесвирусы). Вирусное потомство составляет 10–1000 зрелых вирионов и в несколько раз большее количество дефектных вирионов. Репродукция вирусов заканчивается выходом их из клетки, который происходит взрывным путем почкованием или экзоцитозом.

- *Взрывной путь* характерен для простых (безоболочечных) вирусов: из погибающей клетки одновременно выходит большое количество вирионов.
- *Почкование, экзоцитоз* присущи сложным вирусам, имеющим липопротеиновую оболочку, которая является производной от клеточных мембран. Сначала образовавшийся нуклеокапсид или сердцевина вириона транспортируется к участкам клеточных мембран, в которые уже встроены вирусспецифические

белки, после чего начинается выпячивание этих участков. Сформировавшаяся почка отделяется от клетки в виде сложного вируса, а клетка может длительно оставаться жизнеспособной, продуцируя вирусное потомство.

Вирусы, формирующиеся в ядре клетки (например, герпесвирусы) почкуются в перинуклеарное пространство через модифицированную ядерную мембрану, приобретая таким образом липопротеиновую оболочку. Затем они транспортируются в составе цитоплазматических везикул на поверхность клетки.

Почкование вирусов, формирующихся в цитоплазме, может происходить либо через плазматическую мембрану (например, парамиксовирусы, тогавирусы), либо через мембраны эндоплазматической сети с последующим их выходом на поверхность клетки (буньявирусы).

### 3.2.2. Программируемая клеточная смерть (апоптоз)

Вирусы могут вызывать апоптоз инфицированной клетки, предотвращая распространение инфекционного процесса на другие клетки. С другой стороны, многие вирусы имеют механизмы, предотвращающие апоптоз клетки. Так, некоторые ДНК-вирусы кодируют белки, сходные с клеточными *Bcl*-2-белками, контролирующими апоптоз в результате усиления клеточной пролиферации.

### 3.2.3. Непродуктивные инфекции

Иногда вирус заражает клетку, но его репродукция не завершается. Если вирусный геном персистирует в клетке, то говорят о латентной инфекции.

**Латентная инфекция** поддерживается в инфицированной клетке в виде последовательности вирусной ДНК, интегрированной в геном клетки, или в виде множественных копий ковалентно замкнутой циркулярной ДНК вируса. Например, герпесвирусы обычно вызывают латентные инфекции, при которых вирусный геном поддерживается как циркулярная эписома в ядре, экспрессируя только несколько вирусных генов и не образуя инфекционного вируса. В эукариотической клетке вирусная ДНК связана с гистонами этой клетки, которые играют стабилизирующую роль в латенции.

**Абортивный тип взаимодействия вирусов** с клеткой не завершается образованием вирусного потомства. Причины развития абор-

тивного типа разнообразны: заражение чувствительных клеток дефектными вирусами или дефектными вирионами; заражение стандартным вирусом генетически резистентных к нему клеток; заражение стандартным вирусом чувствительных клеток в непермиссивных (неразрешающих) условиях. Различают дефектные вирусы и дефектные вирионы.

- *Дефектные вирусы* существуют как самостоятельные виды, которые репродуцируются лишь при наличии вируса-помощника (например, вирус гепатита D репродуцируется только в присутствии вируса гепатита B).
- *Дефектные вирионы* обычно лишены части генетического материала и могут накапливаться в популяции многих вирусов при множественном заражении клеток. Имеются дефектные интерферирующие частицы (ДИ-частицы), которые интерферируют с репродукцией стандартного вируса и подавляют воспроизводство вирусного потомства. Таким образом, ДИ-частицы могут защищать организм от болезнетворного вируса.

Абортивный тип взаимодействия чаще наблюдается при заражении непермиссивных (нечувствительных) клеток стандартным вирусом. Механизм генетически обусловленной резистентности клеток к вирусам широко варьирует. Он может быть связан: с отсутствием на плазматической мембране специфических рецепторов для вирусов; неспособностью данного вида клеток инициировать трансляцию вирусной иРНК; отсутствием специфических протеаз или нуклеаз, необходимых для синтеза вирусных макромолекул и т.д. Абортивный тип взаимодействия может также возникать при изменении условий, в которых происходит репродукция вирусов: повышение температуры организма, изменение pH в очаге воспаления, введение в организм противовирусных препаратов и др. Некоторые абортивные инфекции могут приводить к уничтожению клетки хозяина. При устранении неразрешающих условий абортивный тип переходит в продуктивный тип взаимодействия вирусов с клеткой.

**Интегративный тип взаимодействия** вирусов с клеткой (вирогения) заключается во взаимном сосуществовании вируса и клетки в результате интеграции (встраивания) генома вируса в хромосому клетки хозяина. При этом интегрированный геном вируса реплицируется и функционирует как составная часть генома клетки.

Интегративный тип взаимодействия характерен для умеренных ДНК-содержащих бактериофагов, онкогенных вирусов и некоторых инфекционных как ДНК-содержащих (например, вируса гепатита В), так и РНК-содержащих (например, ВИЧ) вирусов. С геномом клетки интегрирует двунитевая ДНК вируса в кольцевой форме, которая прикрепляется к клеточной ДНК в месте гомологии нуклеотидных последовательностей и встраивается в определенный участок хромосомы при участии ферментов (рестриктаз, эндонуклеаз, лигаз).

Более сложным является процесс интеграции у РНК-содержащих вирусов. Он начинается с механизма обратной транскрипции, который заключается в синтезе комплементарной нити ДНК на матрице вирусной РНК с помощью вирионной обратной транскриптазы (ревертазы). После образования двунитевой ДНК и замыкания ее в кольцо происходит интеграция ДНК-транскрипта в хромосому клетки. Встроенная в хромосому клетки ДНК вируса называется *провирусом*, или провирусной ДНК. Провирус реплицируется в составе хромосомы и переходит в геном дочерних клеток, т.е. состояние вирогении наследуется. Однако под влиянием некоторых физических или химических факторов провирус может исключаться из хромосомы клетки и переходить в автономное состояние с развитием продуктивного типа взаимодействия с клеткой.

Дополнительная генетическая информация провируса при вирогении сообщает клетке новые свойства, что может быть причиной *онкогенной трансформации клеток и развития опухолей*, а также развития аутоиммунных и хронических заболеваний. Сохранение вирусной информации в виде провируса в составе клеточного генома и передача ее потомству лежат в основе персистенции (от лат. *persistentia* — упорство, постоянство) вирусов в организме и развития латентных (скрытых) вирусных инфекций.

## 3.3. Культивирование вирусов

Вирусы культивируют для лабораторной диагностики вирусных инфекций, изучения патогенеза и иммунитета при вирусных инфекциях, а также для получения вакцин и диагностических препаратов. Поскольку вирусы являются облигатными внутриклеточными паразитами, их культивируют в организме лабораторных животных, развивающихся куриных эмбрионах и других птиц, а также на культурах клеток (тканей).

Присутствие вируса в исследуемом материале определяют с помощью методов индикации и идентификации. *Индикация вирусов,* т.е. неспецифическое обнаружение факта инфицирования, основано на выявлении биологических свойств вирусов и особенностей их взаимодействия с чувствительными клетками. *Идентификация* означает установление вида или типа вируса. Она осуществляется в основном с помощью иммунных реакций или молекулярно-генетических методов (ПЦР и др.).

Вирусы можно культивировать в организме восприимчивых к ним лабораторных животных (белые мыши, хомячки, кролики, обезьяны и др.), которых заражают вируссодержащим материалом различными способами в зависимости от тропизма вирусов (подкожно, внутримышечно, интраназально, интрацеребрально и т.д.). Наличие вирусов выявляют по развитию у животных клинических проявлений заболевания, патоморфологическим изменениям органов и тканей, а также на основании реакции гемагглютинации (РГА) с вируссодержащим материалом. РГА основана на способности многих вирусов склеивать (агглютинировать) эритроциты своими гликопротеиновыми шипами (гемагглютининами).

Другой моделью культивирования вирусов являются куриные эмбрионы (5–12-дневные), которых заражают исследуемым материалом в различные полости и ткани зародыша. Таким образом можно культивировать вирусы гриппа, герпеса, натуральной оспы и др. Свидетельством репродукции вирусов в куриных эмбрионах являются специфические поражения оболочек и тела эмбриона (оспины, кровоизлияния), гибель эмбриона, положительная РГА с вируссодержащей жидкостью, полученной из полостей зараженного зародыша.

Часто вирусы культивируют на культуре клеток. Метод культур клеток был впервые разработан в 1949 г. Дж. Эндерсом и соавт., получившими за разработку техники культивирования вируса полиомиелита Нобелевскую премию в 1954 г. Изолированные клетки, полученные из различных органов и тканей человека, животных, птиц и других биологических объектов, размножают на искусственных питательных средах в специальной лабораторной посуде. Широко распространены культуры клеток из эмбриональных и опухолевых (злокачественно перерожденных) тканей, обладающих по сравнению с нормальными клетками взрослого организма более активной способностью к росту и размножению.

Культуры клеток обычно состоят из одного-двух основных типов клеток. Так, фибробласты имеют вытянутую форму, тогда как эпителиальные клетки имеют многоугольную форму.

Культуру клеток выращивают с соблюдением оптимальной температуры (36–38,5 °С) роста клеток и асептических условий в специальной лабораторной посуде (пробирки, флаконы, матрасы) или в реакторах для получения биотехнологической продукции. При этом используют сложную питательную среду Игла, среду 199 и другие среды, содержащие необходимые для роста клеток аминокислоты, минеральные соли, витамины, глюкозу, сыворотку крови животных или человека, буферные растворы для поддержания стабильного pH. Для подавления роста посторонней микрофлоры в среды для культивирования клеток добавляют антибиотики.

Различают однослойные, суспензионные и органные культуры клеток. Клетки *однослойной культуры клеток* прикрепляются и размножаются на поверхности лабораторной посуды в виде монослоя. Они получили наибольшее применение в вирусологии. Клетки *суспензионных культур клеток* размножаются во всем объеме питательной среды при постоянном ее перемешивании с помощью магнитной мешалки или вращающегося барабана. Метод применяют для получения большого количества клеток, например, при промышленном получении вирусных вакцин. *Органные культуры* применяются ограниченно. Они представляют собой цельные кусочки органов и тканей, сохраняющие при культивировании исходную структуру.

По свойствам жизнеспособных генераций культуры клеток подразделяют на первичные, или первично-трипсинизированные, перевиваемые, или стабильные и полуперививаемые.

*Первичные культуры клеток* размножаются только в первых генерациях, т.е. выдерживают не более 5–10 пассажей после выделения из тканей. Их получают при обработке кусочков тканей (эмбриональных, опухолевых или нормальных) протеолитическими ферментами, которые разрушают межклеточные связи в тканях и органах с образованием изолированных клеток.

*Перевиваемые*, или *стабильные, культуры клеток* способны размножаться в лабораторных условиях неопределенно длительный срок (десятки лет), т.е. выдерживают многочисленные пассажи. Их получают преимущественно из опухолевых или эмбриональных тканей, обладающих большой потенцией роста. Перевиваемые

культуры клеток имеют преимущества перед первичными культурами: продолжительность их культивирования, высокая скорость размножения опухолевых и эмбриональных клеток, меньшая трудоемкость, способность культур сохранять свои свойства в замороженном состоянии в течение многих лет, возможность использования международных линий культур во многих лабораториях мира. Однако злокачественный характер клеток и соматические мутации, претерпеваемые нормальными клетками в процессе многочисленных генераций, ограничивают использование этого вида культур, в частности их нельзя применять в производстве вирусных вакцин.

*Полуперививаемые культуры клеток* имеют ограниченную продолжительность жизни и выдерживают 40—50 пассажей. Их обычно получают из диплоидных клеток эмбриона человека. В процессе пассажей эти культуры сохраняют диплоидный набор хромосом, характерный для соматических клеток исходной ткани, и не претерпевают злокачественную трансформацию. Поэтому полуперививаемые культуры клеток могут быть использованы как в диагностике, так и в производстве вакцин. О репродукции вирусов в культуре клеток, зараженных вируссодержащим материалом, можно судить на основании следующих феноменов: цитопатогенного действия (ЦПД) вирусов, или цитопатического эффекта (ЦПЭ), образования внутриклеточных включений, образования бляшек, реакций гемадсорбции и гемагглютинации; цветной реакции.

*ЦПД,* или *ЦПЭ,* — видимые под микроскопом морфологические изменения клеток (вплоть до их отторжения от стекла), возникающие в результате внутриклеточной репродукции вирусов. В зависимости от особенностей репродуцирующихся вирусов ЦПД может различаться. В одних случаях быстро вакуолизируется цитоплазма, разрушаются митохондрии, округляются и гибнут клетки, в других формируются гигантские многоядерные клетки (так называемые симпласты) или наблюдается явление клеточной пролиферации, которое в итоге заканчивается деструкцией клеток. Таким образом, характер ЦПД позволяет использовать этот феномен не только для индикации вирусов, но и для их ориентировочной идентификации в культуре клеток. Другим проявлением ЦПЭ является образование внутриклеточных включений в ядре или цитоплазме зараженных клеток. Часто включения представляют собой скопления вирионов или их компонентов, иногда они могут содержать клеточный материал. Выявляют включения с помощью

светового или люминесцентного микроскопа после окрашивания зараженных клеток соответственно анилиновыми красителями или флюорохромами. Включения могут отличаться по величине (от 0,2 до 25 мкм), форме (округлые или неправильные) и численности (одиночные и множественные). Характерные цитоплазматические включения формируются в клетках, инфицированных вирусом натуральной оспы (тельца Гварниери), бешенства (тельца Бабеша–Негри), а внутриядерные включения — при заражении аденовирусами или вирусами герпеса.

***Бляшки***, или ***негативные***, ***колонии*** представляют собой ограниченные участки разрушенных вирусами клеток в сплошном монослое культур клеток (рис. 3.8). Они видны невооруженным глазом в виде светлых пятен на фоне окрашенного монослоя живых клеток. Добавление агара в питательную среду ограничивает распространение вирусов по всему монослою после выхода из разрушенной клетки и обеспечивает взаимодействие вирусов только с соседними клетками. Каждая бляшка образуется потомством одного вириона. Подсчитав количество бляшек, можно определить концентрацию вирусов в исследуемом материале. Кроме того, бляшки разных групп вирусов отличаются по размеру, форме, срокам появления. Поэтому метод бляшек используют для дифференциации вирусов,

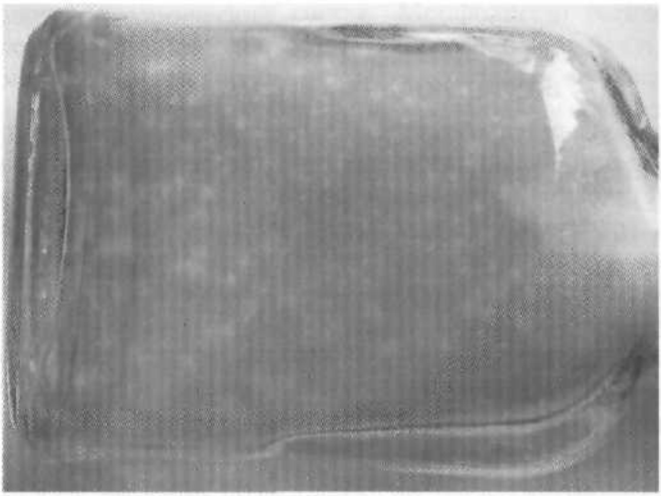


**Рис. 3.8.** Образование «бляшек» в культуре клеток, зараженных вирусом

а также для селекции штаммов и получения чистых линий вирусов. Однако не все вирусы могут вызывать цитопатический эффект, тогда их выявляют другими методами.

В основе *реакции гемадсорбции* лежит способность культур клеток, инфицированных вирусами, адсорбировать на своей поверхности эритроциты. Целый ряд вирусов (гриппа, парагриппа и др.) обладают гемадсорбирующими свойствами, что позволяет использовать реакцию гемадсорбции для индикации этих вирусов даже при отсутствии выраженного ЦПД в культуре клеток. Механизмы реакции гемадсорбции и гемагглютинации сходны. Поэтому для обнаружения репродукции некоторых вирусов в культуре клеток можно использовать реакцию гемагглютинации с культуральной жидкостью, т.е. с питательной средой, содержащей размножившиеся вирусы.

Присутствие в культуре клеток популяции вирусов можно также выявить с помощью *цветной реакции,* которая регистрируется по цвету индикатора питательной среды для культур клеток. При репродукции вирусов нормальный метаболизм клеток нарушается (клетки гибнут) и среда сохраняет свой первоначальный цвет. Если же вирусы не размножаются в культуре клеток, то клетки, оставаясь жизнеспособными, в процессе метаболизма выделяют кислые продукты, изменяющие pH среды и соответственно цвета индикатора.

## 3.4. Бактериофаги (вирусы бактерий)

Бактериофаги (от «бактерия» и греч. *phagos* — пожирающий) — вирусы, специфически проникающие в бактерии, использующие их биосинтетические системы для своей репродукции и вызывающие их лизис (растворение, разрушение клеток). Впервые явление самопроизвольного лизиса сибиреязвенных бактерий наблюдал один из основоположников отечественной микробиологии Н.Ф. Гамалея (1898). Английский бактериолог Ф. Туорт (1915) описал способность фильтрата стафилококков растворять свежую культуру этих же бактерий. Однако лишь французский ученый Ф. д'Эрелль (1917) правильно оценил это явление, выделив фильтрующийся литический агент из испражнений больных дизентерией. Добавление литического агента к мутной бульонной культуре дизентерийных бактерий приводило к полному просветлению среды. Ана-

логичный эффект д'Эррель наблюдал и на плотных питательных средах, засеянных смесью литического агента с соответствующими бактериями. На фоне сплошного бактериального роста появлялись стерильные пятна круглой или неправильной формы — участки лизиса бактерий, названные негативными колониями, или бляшками. Предположив, что имеет дело с вирусами, д'Эрелль выделил этот литический агент с помощью бактериальных фильтров и назвал его бактериофагом — пожирателем бактерий.

Бактериофаги широко распространены в природе. Они обнаружены в воде, почве, пищевых продуктах, различных выделениях из организма людей и животных (фекалии, моча, мокрота, гной и т.д.). Особенно большое количество бактериофагов выделяется в период выздоровления больного человека. В настоящее время эти вирусы выявлены у большинства бактерий, а также у некоторых других микроорганизмов, в частности у грибов. Поэтому бактериофаги в широком смысле слова часто называют просто фагами.

Бактериофаги принято обозначать буквами латинского, греческого или русского алфавита, часто с цифровым индексом, перед которым стоит название вида бактерий (например, фаги *E. coli* T2). Для обозначения группы родственных фагов используют родовые и видовые названия микробов, из которых выделены соответствующие фаги: колифаги, стафилофаги, актинофаги, микофаги и т.д.

**Морфология и химический состав**. Морфологию бактериофагов изучают с помощью электронной микроскопии. Фаги, как и просто организованные вирусы человека, состоят из нуклеиновой кислоты (ДНК или РНК) и белковой оболочки — капсида. Однако между собой они в значительной степени различаются по морфологии. В зависимости от формы, структурной организации и типа нуклеиновой кислоты фаги подразделяют на несколько морфологических типов (рис. 3.9). К I типу относятся нитевидные ДНК-содержащие фаги, взаимодействующие с мужскими особями бактерий (см. раздел 2.2 и главу 5). Геном фагов представлен однонитевой ДНК, заключенной в спиральный капсид. II тип включает мелкие РНК-содержащие и однонитевые ДНК-содержащие фаги, геном которых находится внутри икосаэдрического капсида (головки) с аналогом отростка. К III типу относятся икосаэдрические фаги с коротким отростком, содержащие двунитевую ДНК. IV и V типы — сложные по морфологии ДНК-содержащие фаги, имеющие форму сперматозоида: икосаэдрический капсид головки

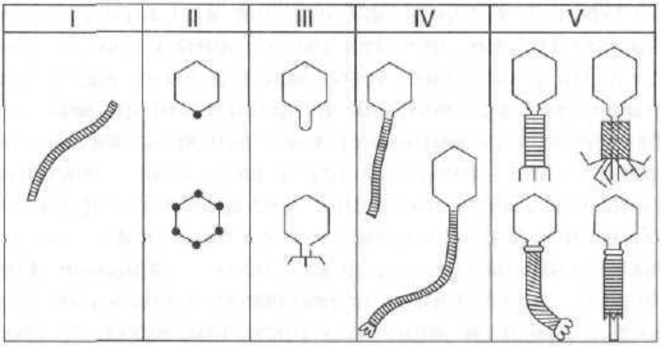



**Рис. 3.9.** Морфологические типы бактериофагов (объяснение в тексте)

соединен с длинным хвостовым отростком. V тип фагов отличается от VI типа тем, что чехол их отростков способен к сокращению. Размеры фагов колеблются от 20 до 800 нм (нитевидный тип).

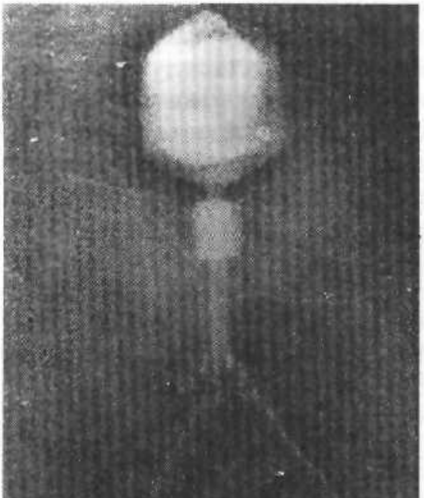



**Рис. 3.10.** Строение Т-четного фага (электронограмма)

Наиболее изучены крупные бактериофаги, имеющие форму сперматозоида и сокращающийся чехол отростка (рис. 3.10), например колифаги Т2, Т4, Т6 (от англ. *type* — типовые). У этих фагов молекула двунитевой суперспирализованной ДНК находится внутри головки размером 65–100 нм и защищена капсидом. Капсид состоит из белковых молекул — идентичных полипептидных субъединиц, уложенных по икосаэдрическому (кубическому) типу симметрии. В состав головки также входит полипептид, состоящий из аспарагиновой, глутаминовой кислот и лизина. У некоторых фагов внутри головки находится внутренний гистоноподобный белок, обеспечивающий суперспирализа-

цию ДНК. Хвостовой отросток длиной более 100 нм имеет внутри полый цилиндрический стержень, сообщающийся с головкой, а снаружи — чехол (футляр), способный к сокращению наподобие мышцы. Чехол хвостового отростка образован белковыми субъединицами, уложенными по спиральному типу симметрии, содержит АТФ и ионы Са. На дистальном конце отростка имеется шестиугольная базальная пластинка с шипами, от которых отходят нитевидные структуры — фибриллы.

У некоторых фагов (например, Т2) в дистальной части отростка содержится фермент лизоцим.

**Антигенные свойства**. Бактериофаги содержат группоспецифические и типоспецифические антигены, обладают иммуногенными свойствами, вызывая синтез специфических антител в организме. Антитела, взаимодействуя с бактериофагами, могут нейтрализовать их литическую активность в отношении бактерий. По типоспецифическим антигенам фаги делят на серотипы.

**Резистентность**. По сравнению с вирусами человека бактериофаги более устойчивы к факторам окружающей среды. Они инактивируются под действием температуры 65–70 °С, УФ-облучения в высоких дозах, ионизирующей радиации, формалина и кислот. Длительно сохраняются при низкой температуре и высушивании.

**Взаимодействие фагов с бактериальной клеткой**. Взаимодействие фагов с бактериями может протекать, как и у других вирусов, по продуктивному, абортивному и интегративному типам. При *продуктивном* типе взаимодействия образуется фаговое потомство, бактерии лизируются; при *абортивном* типе фаговое потомство не образуется и бактерии сохраняют свою жизнедеятельность, при *интегративном* типе геном фага встраивается в хромосому бактерии и сосуществует с ней. В зависимости от типа взаимодействия различают вирулентные и умеренные бактериофаги.

*Вирулентные бактериофаги* взаимодействуют с бактерией по продуктивному типу. Проникнув в бактерию, они репродуцируются с образованием 200–300 новых фаговых частиц и вызывают лизис бактерий. Процесс взаимодействия с бактериями в достаточной мере изучен у бактериофагов, имеющих отросток с сокращающимся чехлом. Он состоит из последовательно сменяющих друг друга стадий и весьма схож с процессом взаимодействия вирусов человека и животных с клеткой хозяина. Однако имеются и некоторые особенности.

Специфическая адсорбция фагов происходит только при соответствии прикрепительных белков вирусов и рецепторов бактериальной клетки липополисахаридной или липопротеиновой природы, находящихся в ее клеточной стенке. На бактериях, лишенных клеточной стенки (протопласты, сферопласты), бактериофаги не могут адсорбироваться. Фаги, имеющие хвостовой отросток, прикрепляются к бактериальной клетке свободным концом отростка (фибриллами базальной пластинки). В результате активации АТФ чехол хвостового отростка сокращается и стержень с помощью лизоцима, растворяющего прилегающий фрагмент клеточной стенки, как бы просверливает оболочку клетки. При этом ДНК фага, содержащаяся в его головке, проходит в форме нити через канал хвостового стержня и инъецируется в клетку, а капсидные оболочки фага остаются снаружи бактерии.

Инъецированная внутрь бактерии нуклеиновая кислота подавляет биосинтез компонентов клетки, заставляя ее синтезировать нуклеиновую кислоту и белки фага. Процесс синтеза вирусных белков и репликация фаговых геномов в бактериальной клетке аналогичны процессу репродукции других вирусов, содержащих двунитевую ДНК. РНК-полимераза клетки транскрибирует некоторые гены фаговой ДНК, в результате чего образуются ранние иРНК. Рибосомы клетки транслируют иРНК, при этом синтезируется целый ряд ферментов, включая те, которые необходимы для репликации фаговой ДНК. Репликация двунитевой ДНК фагов протекает в соответствии с общим механизмом репликации. После начала репликации фаговой ДНК начинается синтез поздних вирусных иРНК, в результате трансляции которых образуется второй набор вирусспецифических белков, в том числе капсидных белков фагов.

После образования компонентов фага происходит самосборка частиц: сначала пустотелые капсиды головок заполняются нуклеиновой кислотой, затем сформированные головки соединяются с хвостовыми отростками. При литической инфекции в клетке появляется еще один поздний вирусспецифический белок — фаговый лизоцим. Этот фермент воздействует на пептидогликановый слой стенки бактерии, делая ее менее прочной. В конце концов под действием внутриклеточного осмотического давления оболочка клетки разрывается и фаговое потомство выходит в окружающую среду вместе с остальным содержимым бактериальной клетки. Весь литический цикл от адсорбции бактериофага на бактерии до его выхода из нее занимает 20—40 мин.

*У некоторых фагов механизм адсорбции, проникновения и* высвобождения из клеток совершенно иной. Например, у нитевидных фагов на концах капсидной оболочки имеются минорные белки, с помощью которых эти фаги прикрепляются к половым пилям бактерии (см. главу 5). Фаговая ДНК вместе с минорным белком проникают в цитоплазму клетки через ее половые пили. После репликации нуклеиновой кислоты фагов вновь синтезированные белки фаговой оболочки располагаются на клеточной мембране. Сборка и высвобождение нитевидных фагов происходят путем просачивания ДНК через цитоплазматическую мембрану и клеточную стенку бактерии, во время которого они приобретают белковые капсиды. Бактериальная клетка при этом сохраняет свою жизнеспособность.

Взаимодействие фагов с бактериальной клеткой характеризуется определенной степенью специфичности, что явилось основанием для подразделения их на *поливалентные фаги,* способные взаимодействовать с родственными видами бактерий, *моновалентные фаги,* взаимодействующие с бактериями определенного вида, и *типовые фаги*, взаимодействующие с отдельными типами (вариантами) данного вида бактерий.

*Умеренные бактериофаги,* в отличие от вирулентных, взаимодействуют с чувствительными бактериями либо по продуктивному, либо по интегративному типу. Продуктивный цикл умеренного фага идет в той же последовательности, что и у вирулентных фагов, и заканчивается лизисом клетки. При интегративном типе взаимодействия ДНК умеренного фага встраивается в хромосому бактерии, причем в строго определенную гомологическую область хромосомы, реплицируется синхронно с геномом размножающейся бактерии, не вызывая ее лизиса. ДНК бактериофага, встроенная в хромосому бактерии, называется *профагом*, а культура бактерий, содержащих профаг, — *лизогенной.* Само же биологическое явление сосуществования бактерии и умеренного бактериофага носит название *лизогении* (от греч. *lysis* — разложение, *genea* — происхождение). Профаг, ставший частью хромосомы размножающейся бактерии, передается по наследству от клетки к клетке неограниченному числу потомков.

Лизогенные бактерии не образуют структурные вирусные белки и, следовательно, фаговое потомство. В основе сдерживающего механизма репродукции фагов лежит образование в бактерии специфического репрессора — низкомолекулярного белка, по-

давляющего траскрипцию фаговых генов. Биосинтез репрессора детерминируется генами профага. Наличием репрессора можно объяснить способность лизогенных бактерий прибретать иммунитет (невосприимчивость) к последующему заражению гомологичными или близкородственными фагами. Под иммунитетом в данном случае понимается такое состояние бактерии, при котором исключаются процесс вегетативного размножения вышеуказанных фагов и лизис клетки. Однако термин «лизогения» отражает потенциальную возможность лизиса бактерии, содержащей профаг. Действительно, профаги некоторой части лизогенной культуры бактерий могут спонтанно (самопроизвольно) или направленно под действием ряда физических или химических факторов дерепрессироваться, исключаться из хромосомы и переходить в вегетативное состояние. Этот процесс заканчивается продукцией фагов и лизисом бактерий. Частота спонтанного лизиса бактерий в лизогенных культурах весьма незначительна. Частоту лизиса бактерий можно значительно увеличить, воздействуя на лизогенную культуру индуцирующими агентами: УФ-лучами, ионизирующим излучением, перекисными соединениями, митомицином С и др. Сам же феномен воздействия, приводящий к инактивации репрессора, называется *индукцией* профага. Явление индукции используют в генетической инженерии. Однако спонтанный лизис лизогенных культур может нанести вред микробиологическому производству. Так, если микроорганизмы — продуценты биологически активных веществ — оказываются лизогенными, существует опасность перехода фага в вегетативное состояние, что приведет к лизису производственного штамма этого микроба.

Геном профага может придавать бактерии новые, ранее отсутствовавшие у нее свойства. Этот феномен изменения свойств микроорганизмов под влиянием профага получил название *фаговой конверсии* (от лат. *conversion* — превращение). Конвертироваться могут морфологические, культуральные, биохимические, антигенные и другие свойства бактерий. Например, только лизогенные культуры дифтерийной палочки способны вызвать болезнь (дифтерию), так как содержат в хромосоме профаг, ответственный за синтез белкового экзотоксина.

Умеренные фаги могут быть дефектными, т.е. неспособными образовывать зрелые фаговые частицы ни в естественных усло-

виях, ни при индукции. Геном некоторых умеренных фагов (P1) может находиться в цитоплазме бактериальной клетки в так называемой плазмидной форме, не включаясь в ее хромосому. Такого рода умеренные фаги используют в качестве векторов в генетической инженерии.

**Практическое применение фагов**. Бактериофаги используют в лабораторной диагностике инфекций при внутривидовой идентификации бактерий, т.е. определении фаговара (фаготипа). Для этого применяют метод *фаготипирования*, основанный на строгой специфичности действия фагов: на чашку Петри с плотной питательной средой, засеянной «газоном» чистой культурой возбудителя, наносят капли различных диагностических типоспецифических фагов. Фаговар бактерии определяется тем типом фага, который вызвал ее лизис (образование стерильного пятна, бляшки или негативной колонии). Метод фаготипирования позволяет выявить источник инфекции и проследить путь возбудителя от источника до восприимчивого организма (эпидемиологическое маркирование).

По содержанию бактериофагов в объектах окружающей среды можно судить о присутствии в них соответствующих патогенных бактерий. Подобные исследования проводят при санитарно-микробиологическом исследовании воды. Например, в системах из поверхностных источников воды перед подачей ее в распределительную сеть определяют наличие колифагов. Колифаги являются одними из санитарно-показательных микробов, характеризующих фекальное загрязнение воды.

Фаги применяют также для лечения и профилактики ряда бактериальных, чаще всего кишечных инфекций. Производят брюшнотифозный, дизентерийный, синегнойный, стафилококковый фаги и комбинированные препараты (колипротейный, пиобактериофаги и др.). Бактериофаги назначают по показаниям перорально, парентерально или местно в виде жидких, таблетированных форм, свечей или аэрозолей. Отличительной чертой фагов является полное отсутствие у них побочного действия. Однако лечебный и профилактический эффект фагов умеренный, поэтому их необходимо применять в комплексе с другими лечебными и профилактическими мероприятиями. Бактериофаги широко применяют в генетической инженерии в качестве векторов для получения рекомбинантных ДНК.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Назовите процесс, при котором бактерии получают энергию путем ферментации глюкозы:
1. Гниение.
2. Брожение.
3. Денитрофикация.
4. Анаэробное дыхание.

**Б.** Большинство болезнетворных бактерий, называемых мезофилами, растут при температуре:
1. 15–20 °С.
2. 20–30 °С.
3. 30–37 °С
4. 50–55 °С.

**В.** Назовите процесс, при котором в присутствии кислорода происходит минерализация белка:
1. Денитрофикация.
2. Брожение.
3. Лиофилизация.
4. Гниение.

**Г.** Назовите механизм, который используется бактериями для доставки внутрь цитозоля клетки эффекторных молекул:
1. Активный транспорт.
2. Секреция по III типу.
3. Секреция по II типу.
4. Транслокация радикалов.

**Д.** Некоторые вирусы в составе своих вирионов имеют РНК-зависимую РНК-полимеразу. Назовите тип нуклеиновой кислоты этих вирусов:
1. Двунитевая ДНК кольцевой формы.
2. Плюс-однонитевая РНК.
3. Минус-однонитевая РНК.
4. Двунитевая ДНК линейная.

**Е.** Назовите последствия интегративного типа взаимодействия вируса и клетки:
1. Вирусоносительство.
2. Трансформация клетки.
3. Гибель клетки.
4. Образование нового поколения вирионов.

**Ж.** Взвесь культуры *E. coli* была засеяна в 2 колбы, одна из которых содержала среду № 1, а другая — среду № 2. Посевы были поставлены в термостат с температурой 37 °С. Каждый час отбирали пробы для определения плотности бактериальной популяции, на основании чего были построены кривые роста, которые показали, что продолжительность лаг-фазы в среде № 1 равнялась 20 мин, а в среде № 2 — 50 мин. Назовите более эффективную среду.

**З.** На 3 чашки с кровяным агаром был произведен посев 4 бактериальных культур: А, Б, В, Г. Чашка № 1 была поставлена в термостат с температурой 37 °С. Чашка № 2 была помещена в анаэростат, из которого откачали воздух, и поставили в термостат с температурой 37 °С. Чашка № 3 была поставлена в $CO_2$-инкубатор с температурой 37 °С. Через сутки инкубации были получены следующие результаты. Бактериальная культура А выросла на всех 3 чашках. Бактериальная культура Б выросла только на чашке № 3 (культивирование в атмосфере 5% $CO_2$). Бактериальная культура В выросла только на чашке № 1. Бактериальная культура Г выросла только на чашке № 2. Охарактеризуйте каждый тип культур. Ответ обоснуйте.

# Глава 4

# ЭКОЛОГИЯ МИКРОБОВ — МИКРОЭКОЛОГИЯ

## 4.1. Распространение микробов

Микроорганизмы распространены повсеместно. Они заселяют почву и воду, участвуя в круговороте веществ в природе, уничтожая остатки погибших животных и растений, повышая плодородие почвы и поддерживая устойчивое равновесие в биосфере. Многие из них формируют нормальную микрофлору человека, животных и растений, выполняя полезные функции для своих хозяев.

### 4.1.1. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в природе

Вещества растительного и животного происхождения минерализуются микроорганизмами до углерода, азота, серы, фосфора, железа и других элементов.

*Круговорот углерода.* В круговороте углерода, кроме растений, водорослей и цианобактерий, активное участие принимают микроорганизмы, разлагающие ткани отмерших растений и животных с выделением $CO_2$. При аэробном разложении органических веществ образуются $CO_2$ и вода, а при анаэробном брожении — кислоты, спирты и $CO_2$. Так, при спиртовом брожении дрожжи и другие микроорганизмы расщепляют углеводы до этилового спирта и диоксида углерода. Молочнокислое (вызываемое молочнокислыми бактериями), пропионовокислое (вызываемое пропионобактериями), маслянокислое и ацетонобутиловое (вызываемое клостридиями) брожение и других виды брожения сопровождаются образованием кислот и диоксида углерода.

*Круговорот азота.* Клубеньковые бактерии и свободноживущие микроорганизмы почвы связывают атмосферный азот. Органические соединения растительных, животных и микробных остатков минерализуются микроорганизмами почвы, превращаясь в соеди-

нения аммония. Процесс образования аммиака при разрушении белка микроорганизмами получил название *аммонификации*, или минерализации азота. Белок разрушают псевдомонады, протей, бациллы и клостридии. При аэробном распаде белков образуются аммиак, сульфаты, диоксид углерода и вода, при анаэробном — аммиак, амины, диоксид углерода, органические кислоты, индол, скатол, сероводород. Уробактерии, выделяющиеся с мочой, расщепляют мочевину до аммиака, диоксида углерода и воды. Аммонийные соли, образующиеся при ферментации бактериями органических соединений, используются высшими зелеными растениями. Но наиболее усвояемыми для растений являются нитраты — азотнокислые соли, которые образуются при распаде органических веществ в процессе окисления аммиака до азотистой, а затем азотной кислоты. Этот процесс называется ***нитрификацией,*** а микроорганизмы, его вызывающие, — ***нитрифицирующими.*** Нитрификация проходит в две фазы: первую фазу осуществляют бактерии рода *Nitrosomonas* и др., при этом аммиак окисляется до азотистой кислоты, образуются нитриты; во второй фазе участвуют бактерии рода *Nitrobacter* и др., при этом азотистая кислота окисляется до азотной и превращается в нитраты. Нитрифицирующие бактерии выделил и описал русский ученый С.Н. Виноградский. Нитраты повышают плодородие почвы, однако существует и обратный процесс: нитраты могут восстанавливаться в результате процесса *денитрификации* до выделения свободного азота, что снижает его запас в виде солей в почве, приводя к снижению ее плодородия.

### 4.1.2. Микрофлора почвы

Количество только бактерий в 1 г почвы достигает 10 млрд. Микроорганизмы участвуют в почвообразовании и самоочищении почвы, кругообороте в природе азота, углерода и других элементов. В ней, кроме бактерий, обитают грибы, простейшие и лишайники, представляющие собой симбиоз грибов с цианобактериями. На поверхности почвы микроорганизмов относительно мало из-за губительного действия УФ-лучей, высушивания и других факторов. Пахотный слой почвы толщиной 10—15 см содержит наибольшее количество микроорганизмов. По мере углубления количество микроорганизмов уменьшается вплоть до их исчезновения на глубине 3—4 м. Состав микрофлоры почвы зависит от ее типа и состояния, состава растительности, температуры, влажности и т.д.

Большинство микроорганизмов почвы способны развиваться при нейтральном pH, высокой относительной влажности, температуре 25–45 °С.

В почве живут спорообразующие палочки родов *Bacillus* и *Clostridium*. Непатогенные бациллы (*Bac. megaterium, Bac. subtilis* и др.) наряду с псевдомонадами, протеем и некоторыми другими бактериями являются аммонифицирующими, составляя группу гнилостных бактерий, осуществляющих минерализацию органических веществ. Почва является также местом обитания азотфиксирующих бактерий, усваивающих молекулярный азот (*Azotobacter, Azomonas, Mycobacterium* и др.). Азотфиксирующие разновидности цианобактерий, или сине-зеленых водорослей, применяют для повышения плодородия рисовых полей. Патогенные спорообразующие палочки (возбудители сибирской язвы, ботулизма, столбняка, газовой гангрены) могут длительно сохраняться, даже размножаться в почве. Представители семейства кишечных бактерий (семейство *Enterobacteriaceae*) — кишечная палочка, возбудители брюшного тифа, сальмонеллезов и дизентерии, попав в почву с фекалиями, отмирают. В чистых почвах кишечная палочка и протей встречаются редко; обнаружение бактерий группы кишечной палочки (колиформные бактерии) в значительных количествах является показателем загрязнения почвы фекалиями человека и животных и свидетельствует об ее санитарно-эпидемиологическом неблагополучии из-за возможности передачи возбудителей кишечных инфекций. Количество простейших в почве колеблется от 500 до 500 000 на 1 г почвы. Питаясь бактериями и органическими остатками, простейшие вызывают изменения в составе органических веществ почвы. В почве находятся также многочисленные грибы, токсины которых, накапливаясь в продуктах питания человека, вызывают интоксикации — микотоксикозы и афлатоксикозы.

### 4.1.3. Микрофлора воды

В воде формируются определенные биоценозы с преобладанием микроорганизмов, адаптировавшихся к условиям местонахождения, т.е. физико-химическим условиям, освещенности, степени растворимости кислорода и углекислого газа; содержания органических и минеральных веществ и т.д. Микрофлора воды активно участвует в процессе самоочищения от органических отходов. Утилизация органических отходов связана с деятельностью посто-

янно обитающих в воде микроорганизмов, т.е. составляющих аутохтонную микрофлору. В пресных водоемах находятся различные бактерии: палочковидные (псевдомонады, аэромонады и др.), кокковидные (микрококки), извитые и нитевидные (актиномицеты). На дне водоемов, в иле увеличивается количество анаэробов. При загрязнении воды органическими веществами появляется большое количество непостоянных (аллохтонных) представителей микрофлоры воды, которые исчезают в процессе самоочищения воды.

Вода — фактор передачи возбудителей многих инфекционных заболеваний. Вместе с загрязненными ливневыми, талыми и сточными водами в озера и реки попадают представители нормальной микрофлоры человека и животных (кишечная палочка, цитробактер, энтеробактер, энтерококки, клостридии) и возбудители *кишечных инфекций* (брюшного тифа, паратифов, дизентерии, холеры, лептоспироза, энтеровирусных инфекций, криптоспоридиоза и др.). Некоторые возбудители могут даже размножаться в воде (холерный вибрион, легионеллы). Вода артезианских скважин практически не содержит микроорганизмов, так как последние обычно задерживаются верхними слоями почвы.

Вода океанов и морей также содержит различные микроорганизмы, в том числе архебактерии, светящиеся и галофильные (солелюбивые) бактерии, например галофильные вибрионы, поражающие моллюски и некоторые виды рыб, при употреблении которых в пищу развивается пищевая токсикоинфекция. Кроме этого отмечено большое количество нанобактерий, например *Sphingomonas*, которые проходят через фильтр с диаметром пор 0,2 мкм.

### 4.1.4. Микрофлора воздуха

В воздух попадают микроорганизмы из почвы, воды, а также с поверхности тела, из дыхательных путей и с каплями слюны человека и животных. Много микроорганизмов содержится в воздухе закрытых помещений, микробная обсемененность которых зависит от условий уборки помещения, уровня освещенности, количества людей в помещении, частоты проветривания и др. Большее количество микроорганизмов присутствует в воздухе крупных городов, меньшее — в воздухе сельской местности. Особенно мало микроорганизмов в воздухе над лесами, горами и морями.

Здесь обнаруживаются кокковидные и палочковидные бактерии, бациллы, клостридии, актиномицеты, грибы и вирусы. Воздух рассматривают как фактор передачи респираторных инфекций, при которых возбудитель передается воздушно-капельным или воздушно-пылевым путем. Солнечные лучи и другие факторы способствуют гибели микрофлоры воздуха. Для снижения микробной обсемененности воздуха проводят влажную уборку помещения в сочетании с вентиляцией и очисткой (фильтрацией) поступающего воздуха. Применяют также аэрозольную дезинфекцию и обработку помещений лампами УФ-излучения (например, в микробиологических лабораториях и операционных блоках).

### 4.1.5. Микрофлора бытовых и медицинских объектов

В бытовых объектах встречаются микроорганизмы почвы, воды, воздуха, растений, выделений человека и животных. В формировании микрофлоры объектов медицинских учреждений может принимать участие патогенная и условно-патогенная микрофлора, выделяемая от больных или медицинского персонала, а также микрофлора, привносимая с перевязочным или другими материалами, лекарственными препаратами и т.д. В увлажненных участках (душевые, ванные, водосточные трубы, раковины и др.) могут размножаться возбудители сапронозных и оппортунистических инфекций — легионеллы, аэромонады, псевдомонады, клебсиеллы, протеи.

## 4.2. Микрофлора организма человека

Микрофлора тела человека играет чрезвычайно важную роль в поддержании его здоровья на оптимальном уровне. Нормальная микрофлора представляет собой совокупность множества *микробиоценозов* (сообществ микроорганизмов), характеризующихся определенным составом и занимающих тот или иной *биотоп* (кожу и слизистые оболочки) в организме человека и животных, сообщающийся с окружающей средой. Организм человека и его микрофлора находятся в состоянии динамического равновесия (эубиоза) и являются единой экологической системой.

В любом микробиоценозе следует различать так называемые характерные виды (облигатные, аутохтонные, индигенные, резидентные). Представители этой части микрофлоры постоянно присутствуют в организме человека и играют важную роль в метаболизме

хозяина и защите его от возбудителей инфекционных заболеваний. Вторая составляющая нормальной микрофлоры — *транзиторная микрофлора* (аллохтонная, случайная). Представители *факультативной* части микрофлоры достаточно часто встречаются у здоровых людей, но их качественный и количественный состав непостоянен и время от времени меняется. Количество характерных видов относительно невелико, зато численно они всегда представлены наиболее обильно.

**Функции нормальной микрофлоры**

- Создание колонизационной резистентности.
- Регуляция газового состава, редокс-потенциала кишечника и других полостей организма хозяина.
- Продукция ферментов, участвующих в метаболизме белков, углеводов, липидов, а также улучшение пищеварения и усиление перистальтики кишечника.
- Участие в водно-солевом обмене.
- Участие в обеспечении эукариотических клеток энергией.
- Детоксикация экзогенных и эндогенных субстратов и метаболитов преимущественно за счет гидролитических и восстановительных реакций.
- Продукция биологически активных соединений (аминокислоты, пептиды, гормоны, жирные кислоты, витамины).
- Иммуногенная функция.
- Морфокинетическое действие (влияние на структуру слизистой оболочки кишечника, поддержание морфологического и функционального состояния желез, эпителиальных клеток).
- Мутагенная или антимутагенная функция.
- Участие в канцеролитических реакциях (способность индигенных представителей нормальной микрофлоры нейтрализовывать вещества, индуцирующие канцерогенез).

Важнейшей функцией нормальной микрофлоры является ее участие в создании колонизационной резистентности (сопротивляемость, устойчивость к заселению посторонней микрофлорой). Механизм создания колонизационной резистентности комплексный. Колонизационная резистентность обеспечивается способностью некоторых представителей нормальной микрофлоры адгезироваться на эпителии слизистой оболочки кишечника, образуя на ней пристеночный слой и тем самым препятствуя прикреплению патогенных и условно-патогенных возбудителей инфекционных

заболеваний. Другой механизм создания колонизационной резистентности связан с синтезом индигенными микроорганизмами ряда веществ, подавляющих рост и размножение патогенов, прежде всего органических кислот, перекиси водорода и других биологически активных субстанций, а также с конкуренцией с патогенными микроорганизмами за источники питания.

Состав микрофлоры и размножение ее представителей контролируются прежде всего макроорганизмом (колонизационная резистентность, связанная с организмом хозяина) с помощью следующих факторов и механизмов:

- механических факторов (десквамация эпителия кожи и слизистых оболочек, удаление микробов секретами, перистальтикой кишечника, гидродинамической силой мочи в мочевом пузыре и т.д.);
- химических факторов — соляной кислоты желудочного сока, кишечного сока, желчных кислот в тонкой кишке, щелочного секрета слизистой оболочки тонкой кишки;
- бактерицидных секретов слизистых оболочек и кожи;
- иммунных механизмов — подавление адгезии бактерий на слизистых оболочках секреторными антителами класса IgA.

Различные области тела человека (биотопы) имеют свою характерную микрофлору, отличающуюся по качественному и количественному составу.

**Микрофлора кожи**. Основные представители микрофлоры кожи: коринеформные бактерии, плесневые грибы, спорообразующие аэробные палочки (бациллы), эпидермальные стафилококки, микрококки, стрептококки и дрожжеподобные грибы рода *Malas-sezia*.

Коринеформные бактерии представлены грамположительными палочками, не образующими спор. Аэробные коринеформные бактерии рода *Corynebacterium* обнаруживаются в кожных складках — подмышечных впадинах, промежности. Другие аэробные коринеформные бактерии представлены родом *Brevibacterium*. Они чаще всего встречаются на стопах ног. Анаэробные коринеформные бактерии представлены прежде всего видом *Propionibacterium acnes* — на крыльях носа, головы, спины (сальные железы). На фоне гормональной перестройки они играют значительную роль в возникновении юношеских *acne vulgaris*.

**Микрофлора верхних дыхательных путей.** В верхние дыхательные пути попадают пылевые частицы, нагруженные микроорганизма-

ми, большая часть которых задерживается и погибает в носо- и ротоглотке. Здесь растут бактероиды, коринеформные бактерии, гемофильные палочки, лактобактерии, стафилококки, стрептококки, нейссерии, пептококки, пептострептококки и др. На слизистых оболочках респираторного тракта больше всего микроорганизмов в области носоглотки до надгортанника. В носовых ходах микрофлора представлена коринебактериями, постоянно присутствуют стафилококки (резидентные *S. epidermidis*), встречаются также непатогенные нейссерии, гемофильные палочки.

**Гортань, трахея, бронхи** и **альвеолы** обычно стерильны.

**Пищеварительный тракт.** Качественный и количественный состав различных отделов пищеварительного тракта неодинаков.

**Рот.** В полости рта обитают многочисленные микроорганизмы. Этому способствуют остатки пищи во рту, благоприятная температура и щелочная реакция среды. Анаэробов больше, чем аэробов, в 10–100 раз. Здесь обитают разнообразные бактерии: бактероиды, превотеллы, порфиромонады, бифидобактерии, эубактерии, фузобактерии, лактобактерии, актиномицеты, гемофильные палочки, лептотрихии, нейссерии, спирохеты, стрептококки, стафилококки, пептококки, пептострептококки, вейлонеллы и др. Анаэробы обнаруживаются прежде всего в карманах десен и зубных бляшек. Они представлены родами *Bacteroides*, *Porphyromonas*, *Fusobacterium* и др. Аэробы представлены *Micrococcus spp.*, *Streptococcus spp.* Обнаруживаются также грибы рода *Candida* и простейшие (*Entamaeba gingivalis*, *Trichomonas tenax*). Ассоцианты нормальной микрофлоры и продукты их жизнедеятельности образуют зубной налет.

Антимикробные компоненты слюны, особенно лизоцим, антимикробные пептиды, антитела (секреторный IgA), подавляют адгезию посторонних микробов к эпителиоцитам. С другой стороны бактерии образуют полисахариды: *S. sanguis* и *S. mutans* преобразовывают сахарозу во внеклеточный полисахарид (глюканы, декстраны), участвующие в адгезии к поверхности зубов. Колонизации постоянной частью микрофлоры способствует фибронектин, покрывающий эпителиоциты слизистых оболочек (полный текст см. на диске).

**Пищевод** практически не содержит микроорганизмов.

**Желудок**. В желудке количество бактерий не превышает $10^3$ КОЕ в 1 мл. Размножение микроорганизмов в желудке происходит

медленно из-за кислого значения pH окружающей среды. Чаще всего встречаются лактобактерии, поскольку они устойчивы в кислой среде. Нередки и другие грамположительные бактерии: микрококки, стрептококки, бифидобактерии.

**Тонкая кишка**. Проксимальные отделы тонкой кишки содержат небольшое количество микроорганизмов — не превышает $10^3-10^5$ КОЕ/мл. Чаще всего встречаются лактобактерии, стрептококки и актиномицеты. Это обусловлено, по-видимому, низким значением pH желудка, характером нормальной двигательной активности кишечника, антибактериальными свойствами желчи.

В дистальных отделах тонкой кишки количество микроорганизмов увеличивается, достигая $10^7-10^8$ КОЕ/г, при этом качественный состав сопоставим с таковым микрофлоры толстой кишки.

**Толстая кишка**. В дистальных отделах толстой кишки количество микроорганизмов достигает $10^{11}-10^{12}$ КОЕ/г, а количество встречающихся видов достигает 500. Преобладающими микроорганизмами являются облигатные анаэробы, их содержание в этом отделе пищеварительного тракта превышает таковое аэробов в 1000 раз.

Облигатная микрофлора представлена в основном бифидобактериями, эубактериями, лактобактериями, бактероидами, фузобактериями, пропионобактериями, пептострептококками, пептококками, клостридиями, вейлонеллами. Все они высокочувствительны к действию кислорода.

Аэробные и факультативно анаэробные бактерии представлены энтеробактериями, энтерококками и стафилококками.

В пищеварительном тракте микроорганизмы локализуются на поверхности эпителиальных клеток, в глубоком слое мукозного геля крипт, в толще мукозного геля, покрывающего кишечный эпителий, в просвете кишечника и в бактериальной биопленке.

**Микрофлора желудочно-кишечного тракта новорожденных**. Известно, что желудочно-кишечный тракт новорожденного стерилен, но уже через сутки начинает заселяться микроорганизмами, попадающими в организм ребенка от матери, медицинского персонала и окружающей среды. Первичная колонизация кишечника новорожденного включает несколько фаз:

- 1-я фаза — 10–20 ч после рождения — характеризуется отсутствием микроорганизмов в кишечнике (асептическая);
- 2-я фаза — через 48 ч после рождения — общее количество бактерий достигает $10^9$ и более в 1 г испражнений. Эта фаза

характеризуется заселением кишечника лактобактериями, энтеробактериями, стафилококками, энтерококками, вслед за ними появляются анаэробы (бифидобактерии и бактероиды). Данный этап еще не сопровождается формированием постоянной флоры;

- 3-я фаза — стабилизации — наступает, когда бифидофлора становится основной флорой микробного пейзажа. У большинства новорожденных первой недели жизни формирования стабильной бифидофлоры не происходит. Преобладание бифидобактерий в кишечнике отмечается только на 9–10-е сутки жизни.

Для детей первого года жизни характерны высокие популяционные уровни и частота выявления не только таких групп бактерий, как бифидобактерии, энтерококки, непатогенные эшерихии, но и бактерий, которые принято относить к условно-патогенным группам. Такими группами бактерий являются лецитиназоположительные клостридии, коагулазоположительные стафилококки, грибы рода *Candida*, цитратассимилирующие энтеробактерии и эшерихии с низкой биохимической активностью, а также со способностью к продукции гемолизинов. К концу первого года жизни происходит частичная или полная элиминация условно-патогенных бактерий.

**Характеристика основных представителей микрофлоры кишечника**

**Бифидобактерии** — грамположительные, неспорообразующие палочки, облигатные анаэробы. Преобладают в толстой кишке с первых дней и на протяжении всей жизни. Бифидобактерии выделяют большое количество кислых продуктов, бактериоцинов, лизоцима, что позволяет им проявлять антагонистическую активность по отношению к патогенным микроорганизмам, поддерживать колонизационную резистентность, препятствовать транслокации условно-патогенных микроорганизмов.

**Лактобактерии** — грамположительные неспорообразующие палочки, микроарофилы. Являются представителями индигенной микрофлоры толстой кишки, полости рта и влагалища, обладают выраженной способностью к адгезии к эпителиоцитам кишечника, входят в состав мукозной флоры, участвуют в создании колонизационной резистентности, обладают иммуномодулирующим свойством, способствуют выработке секреторных иммуноглобулинов.

Количество в большей степени зависит от вводимых кисломолочных продуктов и составляет $10^6-10^8$ в 1 г.

**Эубактерии** — *грамположительные неспорообразующие палочки*, строгие анаэробы. У детей, находящихся на грудном вскармливании, встречаются нечасто. Принимают участие в деконъюгации желчных кислот.

**Клостридии** — грамположительные, спорообразующие палочки, строгие анаэробы. Лецитиназоотрицательные клостридии появляются у новорожденных уже в конце 1-й недели жизни, а их концентрация достигает $10^6-10^7$ КОЕ/г. Лецитиназоположительные клостридии (*C. perfringens*) встречаются у 15% детей раннего возраста. Эти бактерии исчезают при достижении ребенком возраста 1,5–2 лет.

**Бактероиды** — грамотрицательные, неспорообразующие *облигатно-анаэробные бактерии. В кишечнике преобладают* бактероиды, относящиеся к группе *B. fragilis*. Это прежде всего *B. thetaiotaomicron*, *B. vulgatus*. Доминирующими в кишечнике ребенка эти бактерии становятся после 8–10 мес жизни: их количество достигает $10^{10}$ КОЕ/г. Участвуют в деконъюгации желчных кислот, обладают иммуногенными свойствами, высокой сахаралитической активностью, способны расщеплять углеводсодержащие компоненты пищи, продуцируя большое количество энергии.

Факультативно анаэробные микроорганизмы представлены эшерихиями и некоторыми другими энтеробактериями, а также грамположительными кокками (стафилококками, стрептококками и энтерококками) и грибами рода *Candida*.

**Эшерихии** — *грамотрицательные палочки, появляются в первые* дни жизни и сохраняются на протяжении всей жизни в количестве $10^7-10^8$ КОЕ/г. Эшерихии, отличавшиеся сниженными ферментативными свойствами, а также способностью к продукции гемолизинов, как и другие бактерии (клебсиеллы, энтеробактеры, цитробактеры, протеи и др.), составляют значительную часть как качественного, так и количественного состава энтеробактерий у детей первого года жизни, но в последующем к концу первого года жизни по мере созревания иммунной системы ребенка происходит частичная или полная элиминация условно-патогенных бактерий.

**Стафилококки** — грамположительные кокки, коагулазоотрицательные стафилококки колонизируют кишечник ребенка с первых дней жизни. Коагулазоположительные (*S. aureus*) в настоящее

*время обнаруживаются более чем у 50% детей в возрасте 6 мес и* после 1,5–2 лет. Источником колонизации детей бактериями вида *S. aureus* является флора кожи людей, окружающих ребенка.

**Стрептококки** и **энтерококки** — грамположительные кокки. Заселяют кишечник с первых дней жизни, количество достаточно стабильное на протяжении жизни — $10^6$–$10^7$ КОЕ/г. Участвуют в создании колонизационной резистентности кишечника.

**Грибы рода *Candida*** — транзиторная микрофлора. У здоровых детей встречаются нечасто.

**Микрофлора мочеполового тракта**. Почки, мочеточники, мочевой пузырь обычно стерильны.

В уретре встречаются коринеформные бактерии, эпидермальный стафилококк, сапрофитные микобактерии (*M. smegmatis*), неклостридиальные анаэробы (превотеллы, порфиромонады), энтерококки.

Основными представителями микрофлоры влагалища у женщин репродуктивного возраста являются лактобактерии, их количество достигает $10^7$–$10^8$ в 1 мл вагинального отделяемого. Колонизация влагалища лактобактериями обусловлена высоким уровнем эстрогенов у женщин детородного возраста. Эстрогены индуцируют накопление в вагинальном эпителии гликогена, являющегося субстратом для лактобактерий, и стимулируют образование рецепторов для лактобактерий на клетках вагинального эпителия. Лактобактерии расщепляют гликоген с образованием молочной кислоты, которая поддерживает pH влагалища на низком уровне (4,4–4,6) и является важнейшим контролирующим механизмом, препятствующим колонизации патогенными бактериями этой экологической ниши. Продукция перекиси водорода, лизоцима, лактацинов способствует поддержанию колонизационной резистентности.

Нормальная микрофлора влагалища включает бифидобактерии (встречаются редко), пептострептококки, пропионибактерии, превотеллы, бактероиды, порфиромонасы, коринеформные бактерии, коагулазоотрицательные стафилококки. Преобладающими микроорганизмами являются анаэробные бактерии, соотношение анаэробы/аэробы составляет 10/1. Примерно у 50% здоровых сексуально активных женщин обнаруживаются *Gardnerella vaginalis*, *Mycoplasma hominis*, а у 5% — бактерии рода *Mobiluncus*.

На состав микрофлоры влагалища оказывают влияние беременность, роды, возраст. Во время беременности количество лактобактерий повышается и достигает максимума в III триместре бере-

менности. Доминирование лактобактерий у беременных снижает риск патологической колонизации при прохождении его через родовые пути.

Роды приводят к резким изменениям в составе микрофлоры влагалища. Снижается количество лактобактерий и существенно увеличивается количество бактероидов, эшерихий. Данные нарушения микробиоценноза транзиторны, и к 6-й неделе после родов состав микрофлоры возвращается к норме.

После наступления менопаузы в генитальном тракте снижаются *уровни эстрогенов и гликогена, уменьшается количество лак*тобактерий, преобладают анаэробные бактерии, pH приобретает нейтральное значение. Полость матки в норме стерильна.

**Дисбактериоз**

Это клинико-лабораторный синдром, возникающий при целом ряде заболеваний и клинических ситуаций, который характеризуется изменением качественного и количественного состава нормофлоры определенного биотопа, а также транслокацией определенных ее представителей в несвойственные биотопы с последующими метаболическими и иммунными нарушениями. При дисбиотических нарушениях, как правило, происходят снижение колонизационной резистентности, угнетение функций иммунной системы, повышается восприимчивость к инфекционным заболеваниям. Причины, приводящие к возникновению дисбактериозов:

- Длительная антибиотико-, химио- или гормонотерапия. Чаще всего дисбиотические нарушения возникают при использовании антибактериальных препаратов, относящихся к группе аминопенициллинов [ампициллин, амоксициллин, линкозаминов (клиндамицин и линкомицин)]. В этом случае наиболее тяжелым осложнением следует считать возникновение псевдомембранозного колита, ассоциированного с *Clostridium difficile*.
- Воздействие жесткого γ-излучения (лучевая терапия, облучение).
- Заболевания желудочно-кишечного тракта инфекционной и неинфекционной этиологии (дизентерия, сальмонеллезы, онкологические заболевания).
- Стрессовые и экстремальные ситуации.
- Длительное пребывание в стационаре (инфицирование госпитальными штаммами), в условиях замкнутого пространства (космические станции, подводные лодки).

При бактериологическом исследовании регистрируется снижение количества или исчезновение одного или нескольких видов микроорганизмов — представителей индигенной микрофлоры, прежде всего бифидобактерий, лактобактерий. При этом увеличивается количество условно-патогенных микроорганизмов, которые относятся к факультативной микрофлоре (цитратассимилирующие энтеробактерии, протеи), при этом они могут распространяться за пределы характерных для них биотопов.

Различают несколько стадий дисбактериоза.

- *I стадия компенсированная — фаза латентная* (субклиническая). Происходит уменьшение количества одного из представителей индигенной микрофлоры без изменения других составляющих биоценоза. Клинически не проявляется — компенсированная форма дисбактериоза. При этой форме дисбактериоза рекомендуется диета.
- II стадия — субкомпенсированная форма дисбактериоза. Происходят снижение количества или элиминация отдельных представителей индигенной микрофлоры и увеличение содержания транзиторной условно-патогенной микрофлоры. Для субкомпенсированной формы характерны дисфункция кишечника и местные воспалительные процессы, энтерит, стоматит. При этой форме рекомендуются диета, функциональное питание, а для коррекции — пре- и пробиотики.
- III стадия — декомпенсированная. Основные тенденции изменения микрофлоры нарастают, условно-патогенные микроорганизмы становятся доминирующими, и отдельные представители распространяются за пределы биотопа и появляются в полостях, органах и тканях, в которых они обычно не встречаются, например *E. coli* в желчных путях, *Candida* в моче. Развивается декомпенсированная форма дисбактериоза вплоть до тяжелых септических форм. Для коррекции этой стадии нередко приходится прибегать к так называемой селективной деконтаминации — назначению антибактериальных препаратов из группы фторхинолонов, монобактамов, аминогликозидов *per os* с последующей длительной коррекцией микрофлоры с помощью диетического питания, пре- и пробиотиков.

Существует несколько подходов в коррекции дисбиотических нарушений:

- устранение причины, вызвавшей изменения микрофлоры кишечника;

– коррекция диеты (использование кисломолочных продуктов, продуктов питания растительного происхождения, диетических добавок, функционального питания);
– восстановление нормальной микрофлоры с помощью селективной деконтаминации — назначению про-, пре- и синбиотиков.

*Пробиотики* — живые микроорганизмы (молочнокислые бактерии, иногда дрожжи), которые относятся к обитателям кишечника здорового человека, оказывают положительное воздействие на физиологические, биохимические и иммунные реакции организма, через оптимизацию микрофлоры хозяина. В Российской Федерации зарегистрированы и широко используются следующие группы пробиотиков.

- *Бифидосодержащие препараты.* Их действующим началом являются живые бифидобактерии, обладающие высокой антагонистической активностью против широкого спектра патогенных и условно-патогенных бактерий. Эти препараты повышают колонизационную резистентность, нормализуют микрофлору кишечника. Например, *бифидумбактерин*, который содержит живые лиофильно высушенные бифидобактерии — *B. bifidum.*
- *Лактосодержащие препараты.* Действующим началом этих препаратов являются живые лактобактерии, обладающие широким спектром антагонистической активности в отношении патогенных и условно-патогенных бактерий, за счет продукции органических кислот, перекиси водорода, лизоцима; например, препарат *ацилакт,* содержащий 3 штамма *L. acidophilus.*
- *Колисодержащие препараты,* например *колибактерин.* Имеются также поликомпонентные препараты: бификол (содержит бифидобактерии и *E. coli*; линекс, содержащий *B. infantis*, *L. acidophilus*, *E. faecium*.

*Пребиотики* — препараты немикробного происхождения, не способные адсорбироваться в верхних отделах пищеварительного тракта. Они способны стимулировать рост и метаболическую активность нормальной микрофлоры кишечника. Чаще всего вещества, составляющие основу пребиотика, являются низкомолекулярными углеводами (олигосахариды, фруктоолигосахариды), содержащиеся в грудном молоке и в некоторых пищевых продуктах.

*Синбиотики* — комбинация пробиотиков и пребиотиков. Эти вещества избирательно стимулируют рост и метаболическую активность индигенной микрофлоры. Например, препарат биовестин-лакто содержит бифидогенные факторы и биомассу *B. bifidum*, *L. adolescentis*, *L. plantarum*.

При тяжелых нарушениях микробиоценоза используется селективная деконтаминация. Препаратами выбора при этом могут быть антибактериальные препараты, применение которых не нарушает колонизационную резистентность, — фторхинолоны, азренам, перорально аминогликозиды.

## 4.3. Уничтожение микробов в окружающей среде

### 4.3.1. Дезинфекция

Дезинфекция (от лат. *infectia* — инфекция и франц. отрицательной приставки *des*) — комплекс мероприятий по уничтожению во внешней среде не всех, а только определенных возбудителей инфекционных заболеваний. Различают механический, физический и химический способы дезинфекции.

*Механический метод* заключается в удалении микроорганизмов без их гибели путем встряхивания, выколачивания, влажной уборки и вентиляции помещений и т.д. Он не позволяет достигнуть полного обеззараживания обрабатываемых объектов, однако приводит к значительному уменьшению числа патогенных микроорганизмов во внешней среде. К механическому методу относится и использование мембранных фильтров (см. раздел 4.3.2).

*Физический метод* предполагает воздействие на микроорганизмы физических агентов — высокой температуры, УФ-излучения.

*Кипячение* применяют для дезинфекции хирургических инструментов, игл, резиновых трубок. Однако даже кипячение в течение 30 мин в специальных аппаратах-стерилизаторах не уничтожает споры и некоторые вирусы.

*Пастеризация* — это обеззараживание многих пищевых продуктов (вино, пиво, соки), при этом достигается только частичная стерильность; споры микроорганизмов и ряд вирусов не уничтожаются.

*УФ-лучи* применяют для дезинфекции воздуха в микробиологических лабораториях, боксах, операционных. Ее проводят, как правило, ртутными бактерицидными лампами различной мощно-

сти (БУВ-15, БУВ-30 и др.) с длиной волны излучения 253–265 нм. В настоящее время широко используют импульсные ксеноновые лампы, которые отличаются от ртутных тем, что при их разрушении в окружающую среду не попадают пары ртути.

В микробиологической практике широкое применение нашли способы *химической дезинфекции* рабочего места, отработанного патологического материала, градуированных и пастеровских пипеток, стеклянных шпателей, стекол.

*Галогенсодержащие соединения.* Хлорсодержащие вещества, такие, как гипохлориты (соли натрия или калия хлорноватистой кислоты), органические соединения хлора (хлорамин, дихлорризоциануровая кислота), хлороформ и другие, оказывают выраженное антимикробное действие на большинство бактерий, вирусов и простейших. Антимикробный эффект растворов хлорсодержащих веществ связан с наличием активного хлора, который вступает во взаимодействие с белками микробов, вызывая их повреждение. Хлорную известь обычно используют только для дезинфекции, хлорамин Б в виде 1–3% раствора — для дезинфекции, а более слабые растворы — в качестве антисептического вещества: 0,25–0,5% растворы для обработки рук медицинского персонала, 1,5–2% растворы для промывания инфицированных ран.

*Окислители.* Механизм антимикробного действия окислителей связан с выделением атомарного кислорода, который оказывает на микроорганизмы сильное повреждающее действие. Пероксид водорода (3% раствор) обладает относительно слабым антимикробным действием и используется в хирургической практике для обработки инфицированных ран в качестве антисептика. В более высокой концентрации пероксид водорода уничтожает практически все микроорганизмы и вирусы и может использоваться для химической стерилизации.

*Поверхностно-активные вещества (ПАВ)* — катионные, анионные и амфолиты, их антимикробный эффект связан с изменением проницаемости цитоплазматической мембраны и нарушением осмотического равновесия. ПАВ обладают выраженной активностью в отношении бактерий, грибов, вирусов и некоторых простейших.

Наибольшей антимикробной активностью обладают катионные вещества, из которых широкое применение получили четвертичные аммониевые соединения (цетримид, цетилпиридиния хлорид

и др.). Они широко используются в качестве антисептиков (для обработки рук хирурга и операционного поля и др.) и дезинфектантов (для обработки помещений и предметов ухода за больными и др.).

*Спирты.* Чаще всего используются в медицине алифатические спирты (этанол и изопропанол) как антисептическое средство (70% спирт для обработки рук хирурга, 90–95% спирт для дезинфекции хирургических инструментов). Спирты вызывают коагуляцию белков микробной клетки, однако грибы, вирусы и споры бактерий обладают к спиртам выраженной устойчивостью.

*Альдегиды* характеризуются дезинфицирующими, антисептическими и химиотерапевтическими свойствами. Механизм бактерицидного действия связан с алкилированием амино-, сульфгидрильных и карбоксильных групп белков. Формалин (40% водный раствор формальдегида) используют для обработки рук и стерилизации инструментов (0,5–1% растворы), а также для дезинфекции белья, одежды и особенно обуви.

*Фенолы.* Механизм их антимикробной активности связан с денатурацией белков клеточной стенки. Одним из наиболее известных препаратов этой группы является карболовая кислота (в настоящее время применяется крайне редко). При оценке антимикробной активности новых антисептиков и дезинфектантов фенол используется в качестве эталона (фенольный коэффициент). Его применяют в виде 2–5% мыльно-карболовой смеси для дезинфекции одежды, выделений и предметов ухода за больным. Для консервации широко используют также эфиры п-гидроксибензойной кислоты (парабены).

При испытании антимикробной активности дезинфектантов и антисептиков используют стандартные тест-культуры микроорганизмов (золотистый стафилококк, кишечная палочка, бациллы, микобактерии, грибы-трихофитоны и кандиды). Для определения вирулицидной активности применяют тест-вирусы гепатита А и полиомиелита.

### 4.3.2. Стерилизация

Стерилизация (от лат. *sterilis* — бесплодный) — освобождение от всего живого, полное уничтожение в материалах всех микроорганизмов и их спор. Различают физические, химические и механические способы стерилизации.

*Прокаливанием* на пламени спиртовки стерилизуют металлические инструменты, бактериологические петли, иглы, пинцеты, предметные стекла.

*Стерилизация сухим жаром* применяется для обеспложивания стеклянной посуды, пробирок, колб, чашек Петри и пипеток. Для этой цели используют сухожаровые шкафы (печи Пастера), в которых необходимый эффект достигается при температуре 160 °С в течение 2 ч или при температуре выше 170 °С в течение 40 мин.

Принципиальные преимущества сухого жара заключаются в том, что при его применении не происходит коррозии металлов и инструментов, не повреждаются стеклянные поверхности; он пригоден для стерилизации порошков и не содержащих воды нелетучих вязких веществ. К недостаткам данного метода относятся медленная передача тепла и продолжительность стерилизации; при использовании сухого жара более высокие температуры (выше 170 °С) могут неблагоприятно действовать на некоторые металлы, а также вызывать обугливание и возгорание ватных пробок и бумаги.

При обработке сухим жаром микроорганизмы погибают в результате окисления внутриклеточных компонентов. Споры бактерий более устойчивы к сухому жару, чем вегетативные клетки.

*Стерилизация паром под давлением* — один из наиболее эффективных методов, основанный на сильном гидролизующем действии насыщенного пара. Паром под давлением стерилизуют различные питательные среды (кроме содержащих нативные белки), жидкости, приборы, резиновые предметы, стеклянную посуду с резиновыми пробками. Для этой цели применяют паровые стерилизаторы (автоклавы) с вертикальным или горизонтальным размещением котла.

Большинство паровых стерилизаторов относится к гравитационным: пар движется в них сверху вниз под действием разности плотностей пара и воздуха.

Питательные среды, перевязочные материалы и белье стерилизуют при 1 атм в течение 15 мин, питательные среды с углеводами — при 0,5 атм в течение 15 мин, патогенный материал обеззараживают при 1,5–2 атм.

Контроль режима стерилизации осуществляется с помощью химических термотестов и искусственных биотестов. Химические термотесты представляют собой вещества, изменяющие свой цвет или физическое состояние при стерилизации и имеющие разную температуру плавления.

Бактериологический контроль режима стерилизации заключается в том, что в стерилизационную камеру помещают полоски с нанесенными на них спорами одного или двух видов бактерий, со спорами известной численности, со спорами и определенным количеством культуральной среды, суспензиями спор и т.д.

*Стерилизация текучим паром* (дробная стерилизация) — это обеспложивание объектов, разрушающихся при температуре выше 100 °С (питательные среды с аммиачными солями, молоко, желатин, картофель, некоторые углеводы). Обеспложивание проводят в паровом стерилизаторе при открытом спускном кране и незавинченной крышке или в аппарате Коха по 15—30 мин в течение 3 дней подряд. При первой стерилизации погибают вегетативные формы микробов, некоторые споры при этом сохраняются и прорастают в вегетативные особи в процессе хранения питательных сред при комнатной температуре. Последующая стерилизация обеспечивает достаточно надежное обеспложивание объекта.

*Тиндализация* — это стерилизация материалов, легко разрушающихся при высокой температуре (сыворотки, витамины); стерильность достигается повторным прогреванием объекта при 60 °С по 1 ч ежедневно в течение 5—6 дней подряд.

*Лучевая стерилизация* осуществляется либо с помощью $\gamma$-излучения, либо с помощью ускоренных электронов, под влиянием которых повреждаются нуклеиновые кислоты. Проводится в промышленных условиях для стерилизации одноразовых инструментов и белья, лекарственных препаратов.

*Химическая стерилизация* предполагает использование токсичных газов: окиси этилена, смеси ОБ (смесь оксида этилена и бромистого метила в весовом соотношении 1:2,5) и формальдегида. Глутаровый альдегид после активирования буферными системами используется для химической стерилизации тех материалов, которые нельзя стерилизовать другими методами. Эти вещества являются алкилирующими агентами, способными инактивировать активные группы в ферментах, ДНК, РНК, приводя к гибели микробов. Стерилизация газами проводится в специальных камерах. Используется для стерилизации изделий из термолабильных материалов, снабженных оптическими устройствами. Метод небезопасен для людей и окружающей среды, так как стерилизующие агенты остаются на объекте стерилизации.

*Механические методы стерилизации.* Фильтрование применяют в тех случаях, когда повышенная температура может резко повлиять на качество стерилизуемых материалов (питательные среды, сыворотки, антибиотики), а также для очистки бактериальных токсинов, фагов и различных продуктов жизнедеятельности бактерий. Как окончательный процесс оно менее надежно, чем стерилизация паром, из-за большой вероятности прохождения микроорганизмов через фильтры.

Фильтры задерживают микроорганизмы благодаря поровой структуре их материала. Существуют два основных типа фильтров — глубинные и мембранные.

Глубинные фильтры состоят из волокнистых или гранулированных материалов, которые спрессованы, свиты или связаны в лабиринт проточных каналов. Частицы задерживаются в них в результате адсорбции и механического захвата в материале фильтра. Мембранные фильтры имеют непрерывную структуру, получают их из нитроклетчатки, и захват ими частиц определяется в основном размером пор. Они пропускают вирусы и микоплазмы, поэтому фильтрование через мембранные фильтры относят к механическим методам дезинфекции.

### 4.3.3. Асептика и антисептика

Асептика, основоположником которой является Д. Листер (1867), — это комплекс мероприятий, направленных на предупреждение попадания возбудителя инфекции в рану, органы больного при операциях, лечебных и диагностических процедурах. Асептику применяют для борьбы с экзогенной инфекцией, источниками которой являются больные и бактерионосители. Асептика включает стерилизацию и сохранение стерильности инструментов, перевязочного материала, операционного белья, перчаток и всего того, что приходит в соприкосновение с раной, а также дезинфекцию рук хирурга, операционного поля, аппаратуры, операционной и других помещений, применение специальной спецодежды, масок. К мерам асептики относятся также планировка операционных, систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Методы асептики применяются также на фармацевтических и микробиологических производствах, в пищевой промышленности.

Антисептика — совокупность мер, направленных на уничтожение микробов в ране, патологическом очаге или организме в

целом, на предупреждение или ликвидацию воспалительного процесса. Первые элементы антисептики были предложены И. Земмельвейнсом в 1847 г.

Антисептику проводят механическими (удаление некротизированных тканей), физическими (дренирование ран, введение тампонов, введение гигроскопических повязок), биологическими (использование протеолитических ферментов для лизиса нежизнеспособных клеток, применение бактериофагов и антибиотиков) и химическими (применение антисептиков) методами.

*Антисептические средства* убивают или подавляют рост микроорганизмов, находящихся в контакте с поверхностью кожных покровов, слизистых оболочек и соприкасающихся с ними тканей (раны, полости тела). Эти вещества должны характеризоваться выраженным антимикробным эффектом, но не должны обладать токсическими для макроорганизма свойствами (не должны вызывать повреждение и значительное раздражение тканей, не должны задерживать регенераторные процессы и т.д.).

Разделение антимикробных средств на антисептики и дезинфицирующие вещества во многом условно. Так, некоторые антисептики (пероксид водорода и др.) в более высоких концентрациях могут использоваться для дезинфекции помещений, белья, посуды и др. В то же время некоторые дезинфектанты (хлорамин и др.) в невысоких концентрациях применяют для орошения и промывания ран, обработки рук хирургов и т.д. В качестве антисептиков используют следующие группы соединений.

*Йодсодержащие соединения* обладают широким спектром антимикробной активности. Они вызывают коагуляцию белков микроорганизмов и применяются только в качестве антисептиков. Спиртовой раствор йода (3–5%) используют для обработки операционного поля, мелких порезов и ссадин, раствор Люголя – для обработки слизистых оболочек гортани и глотки. За последние годы большое распространение в медицинской практике получили комплексные соединения йода с высокомолекулярными ПАВ (йодофорами), которые характеризуются высокой бактерицидной и спороцидной активностью, не обладают красящим свойством, хорошо растворяются в воде, не раздражают кожу и не вызывают аллергических реакций (йодинол, йодонат, йодовидон). Эти препараты широко используют для обработки операционного поля, лечения гнойных ран, трофических язв, ожогов и др.

*Спирты.* Как антисептическое средство используют 70% спирт для обработки рук хирурга.

*Перманганат калия* (0,04–0,5% растворы) применяют для полосканий, промываний и спринцеваний при воспалительных заболеваниях верхних дыхательных путей, в урологической и гинекологической практике.

*Красители.* В эту группу входят производные трифенилметана (бриллиантовый зеленый, метиленовый синий и др.) и акридиновые красители (профлавин, аминоакрин). Их используют в основном как антисептические средства. Так, например, бриллиантовый зеленый применяют для обработки кожных покровов при небольших травмах, порезах и пиодермиях, метиленовый синий — для лечения циститов и уретритов.

*Кислоты, щелочи* и *эфиры.* Действие препаратов этой группы связано с резким изменением pH среды, оказывающим неблагоприятное действие на большинство микроорганизмов. Чаще всего применяют борную (для полоскания полости рта и зева, промывания глаз), уксусную (обладает хорошей активностью в отношении грамотрицательных бактерий, особенно псевдомонад), бензойную (характеризуется антибактериальным и фунгицидным эффектом) и салициловую (используют в клинике кожных болезней для лечения дерматомикозов) кислоты. Из щелочей наибольшее распространение получил 0,5% раствор аммиака, используемый для обработки рук хирурга.

*Фенол* и близкие к нему вещества входят в состав березового дегтя и ихтиола, назначаемых для лечения инфицированных ран, пролежней, ожогов. Производные фенола (резорцин, хлорофен, триклозан, тимол, салол) применяют в виде мазей, водных и спиртовых растворов при лечении инфекционно-воспалительных заболеваний в дерматологии и хирургии.

*Гексамин (метенамин)* расщепляется в кислой среде очага воспаления с освобождением формальдегида. Этот препарат применяют внутрь и внутривенно для лечения заболеваний мочевыводящих путей, холециститов, менингитов. К группе *альдегидов* относятся также *лизоформ* (для спринцеваний в гинекологической практике), *циминаль* (для лечения трофических язв, ожогов, пиодермий), *цимизоль* (для лечения гнойных ран и пролежней) и *ципидол* (для обработки уретры после случайных половых связей).

*Соединения тяжелых металлов.* Тяжелые металлы вызывают коагуляцию белков микробной клетки. В связи с аккумуляцией в организме эти соединения редко применяются в медицинской практике. Соединения ртути (тиомерсаль, соли фенилртути) назначают при блефаритах и конъюнктивитах; нитрат серебра — при трахоме; протаргол и колларгол — при конъюнктивитах, циститах, уретритах и для обработки гнойных ран; окись цинка, пластырь свинцовый, ксероформ — как антисептические средства при гнойно-воспалительных заболеваниях кожи. Сулема из-за высокой токсичности в настоящее время для лечения больных не используется.

## 4.4. Санитарная микробиология

Для разработки экологически обоснованных мероприятий по защите окружающей среды от биологического загрязнения патогенными микроорганизмами, а также для изучения влияния микрофлоры внешней среды на здоровье человека была создана самостоятельная медико-биологическая дисциплина — санитарная микробиология.

Санитарная микробиология — это наука, которая изучает микрофлору (микробиоту) окружающей среды и ее вредное влияние на организм человека.

**Основные задачи санитарной микробиологии**

- Гигиеническая и эпидемиологическая оценка объектов внешней среды по микробиологическим показателям.
- Разработка нормативов, определяющих соответствие микрофлоры исследуемых объектов гигиеническим требованиям.
- Разработка и экспертиза методов микробиологических и вирусологических исследований разнообразных объектов внешней среды с целью оценки их санитарно-гигиенического состояния.
- Разработка рекомендаций по оздоровлению объектов внешней среды путем воздействия на их микрофлору и оценка эффективности проводимых мероприятий.
- Изучение закономерностей жизнедеятельности микрофлоры окружающей среды как в самой экосистеме, так и во взаимоотношениях с человеком.

Объектами санитарно-микробиологического исследования являются вода, воздух, почва и другие объекты окружающей среды, а также пищевые продукты, оборудование пищеблоков и т.п.

Санитарная микробиология располагает двумя методами, с помощью которых можно определить санитарно-эпидемическое состояние внешней среды:

- прямое обнаружение патогенных микроорганизмов во внешней среде;
- косвенная индикация возможного их присутствия во внешней среде.

Прямой метод является более надежным, но трудоемким и недостаточно чувствительным. Трудности выделения патогенных микроорганизмов из внешней среды обусловлены их незначительной концентрацией, неравномерностью распределения, конкуренцией между патогенными микроорганизмами и сапрофитной микрофлорой. Огромное значение имеет изменчивость возбудителя во внешней среде. Поэтому прямое выделение патогенных микроорганизмов проводят только по эпидемиологическим показаниям.

Второй метод (косвенной индикации) более прост и доступен. Он располагает двумя показателями — критериями, которые позволяют определить санитарно-эпидемическую ситуацию. К ним относят общее микробное число и концентрацию *санитарно-показательных микроорганизмов.*

Общее микробное число (ОМЧ) — это число всех микроорганизмов в 1 см$^3$ (мл) или в 1 г субстрата. При этом исходят из предположения, что чем больше микроорганизмов обнаруживается во внешней среде, тем вероятнее загрязнение патогенными микроорганизмами. Поэтому ОМЧ дает представление об эпидемической обстановке.

*Существуют три метода определения ОМЧ:*

- оптический метод прямого подсчета бактерий под микроскопом в камере Горяева;
- бактериологический метод (менее точный);
- измерение биомассы.

*Оптический метод* обычно используют на водопроводных станциях при оценке эффективности работы очистных сооружений, но он не позволяет отличить живые бактерии от мертвых. Исследование можно выполнить в течение 1 ч, поэтому метод незаменим в аварийных ситуациях. Метод позволяет судить о самоочищении воды. В начальной стадии процесса самоочищения грамотрицательных бактерий больше, чем грамположительных, а палочковидных форм больше, чем кокковых. На завершающей стадии соотношение меняется на обратное.

*Бактериологическим методом* выявляют определенную физиологическую группу бактерий, растущих при данных условиях. Например, обнаружение вегетативных форм микроорганизмов в прошедшем термическую обработку пищевом продукте свидетельствует о повторном заражении продукта после термической обработки или же о неэффективности последней. Обнаружение спор подтверждает удовлетворительную термическую обработку.

Измерение биомассы может проводиться только в специализированных лабораториях путем взвешивания остатков бактериальной массы, определения показателей клеточного обмена и т.д. На практике этот метод не применяется.

Критерий ОМЧ имеет большое значение при проведении сравнительных исследований. В этих случаях внезапное повышение ОМЧ указывает на микробную обсемененность объекта (например, кухонного инвентаря в столовой).

Термин «санитарно-показательные микроорганизмы» (СПМО) обозначает такие микроорганизмы, которые постоянно обитают в естественных полостях тела человека (животных) и постоянно выделяются во внешнюю среду.

Для признания бактерии в качестве СПМО необходимо соблюдение ряда требований, которым должен удовлетворять данный микроорганизм.

- Постоянное обитание в естественных полостях человека и животных и постоянное выделение во внешнюю среду.
- Отсутствие размножения во внешней среде.
- Длительность выживания и устойчивость во внешней среде не меньше или даже выше, чем у патогенных микроорганизмов.
- Отсутствие двойников, с которыми СПМО можно перепутать.
- Относительно низкая изменчивость во внешней среде.
- Наличие простых в исполнении и вместе с тем надежных методов индикации.

Чем выше концентрация СПМО, тем больше вероятность присутствия патогенных микроорганизмов. Их количество выражают в титрах и индексах.

**Титр** — это минимальное количество субстрата (в $см^3$ или г), в котором еще обнаруживаются СПМО.

**Индекс** — это количество СПМО, которое содержится в 1 л воды или в 1 $см^3$ другого субстрата.

Наиболее вероятное число (НВЧ) означает количество СПМО в 1 *л* воды или в 1 *г* (см$^3$) другого субстрата. Это более точный показатель, так как он имеет доверительные границы, в пределах которых может колебаться с вероятностью 95%.

**Общая характеристика СПМО**

В качестве СПМО предложено довольно много микроорганизмов, их можно условно разделить на три группы:

Индикаторы фекального загрязнения (представители микрофлоры кишечника человека и животных).

Индикаторы воздушно-капельного загрязнения (комменсалы верхних дыхательных путей).

Индикаторы процессов самоочищения (обитатели внешней среды).

В состав первой группы СПМО входят:

- *бактерии группы кишечных палочек* (БГКП);
- энтерококки;
- протей;
- сульфитредуцирующие клостридии;
- термофилы, бактериофаги кишечные, сальмонеллы;
- бактероиды, бифидо- и лактобактерии;
- синегнойная палочка;
- кандида;
- ацинетобактер.

В состав второй группы входят стрептококки и стафилококки. В ответах следует указывать: обнаружен санитарно-показательный стафилококк.

В третью группу входят:

- протеолиты;
- аммонификаторы и нитрификаторы;
- *аэромоносы и бделловибрионы*;
- споровые микроорганизмы;
- грибы и актиномицеты;
- целлюлозобактерии.

В действующих нормативных документах по контролю за санитарно-бактериологическими показателями воды, пищевых продуктов, почвы предусмотрен учет БГКП. Следует отметить, что понятие БГКП — утилитарное (санитарно-бактериологическое и экологическое), но не таксономическое. Эта группа представлена микроорганизмами родов *Esherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Serra-*

*tia*, *Klebsiella*, экологические особенности которых определяют их индикаторную значимость.

БГКП — это грамотрицательные, не образующие спор короткие палочки, сбраживающие глюкозу и лактозу с образованием кислоты и газа при 37±0,5 °С в течение 24–48 ч, не обладающие оксидазной активностью. В некоторых официальных документах (по воде, почве, пищевым продуктам) имеются свои особенности формулировки понятия БГКП, не имеющие, однако, принципиального значения.

Еще одним показателем являются общие колиформные бактерии (ОКБ) — это грамотрицательные оксидазоотрицательные палочки, которые на среде Эндо расщепляют лактозу при 37 °С в течение 48 ч.

Род *Escherichia*, включающий типовой вид *E. coli*, служит показателем свежего фекального загрязнения, являясь возможной причиной пищевых токсикоинфекций. Для идентификации используют биохимические тесты с учетом способности к ферментации лактозы при 44±0,5 °С и отсутствия роста на цитратсодержащих средах. В воде их трактуют как термотолерантные колиформные бактерии, в лечебных грязях — как фекальные колиформные бактерии, в пищевых продуктах — как *E. coli*.

Этиологическая значимость бактерий рода *Citrobacter* доказана при эпидемических вспышках, протекающих по типу диспепсий, гастроэнтероколитов, пищевых токсикоинфекций.

Пищевые токсикоинфекции, обусловленные этими микроорганизмами, возникают при употреблении в пищу продуктов, в которых возбудители размножались в течение какого-то времени и накопились в достаточно большом количестве. Источниками инфекции обычно являются больные или бактерионосители. Заболевания, как правило, возникают после употребления зараженных пищевых продуктов (мясных, молочных).

Необходимо отметить, что кишечная палочка не является идеальным СПМО.

Недостатки кишечной палочки как СПМО:

- Обилие аналогов во внешней среде.
- Изменчивость во внешней среде.
- Недостаточная устойчивость к неблагоприятным воздействиям.
- Недостаточно длительное выживание в продуктах по сравнению с шигеллами Зонне, сальмонеллами, энтеровирусами.

- Способность к размножению в воде.
- Нечеткий индикатор даже в отношении присутствия сальмонелл.

Все эти факты вынудили искать замену кишечной палочке. В 1910 г. на роль СПМО были предложены энтерококки (*Enterococcus faecalis* и *Enterococcus faecium*).

**Преимущества энтерококка как СПМО**

- Постоянно находится в кишечнике человека и постоянно выделяется во внешнюю среду. При этом *E. faecalis* в основном обитает в кишечнике человека, поэтому обнаружение его свидетельствует о загрязнении фекалиями людей. В меньшей степени у человека встречается *E. faecium*. Последний в основном обнаруживается в кишечнике животных, хотя сравнительно редко также отмечается и *E. faecalis*.
- Не способен размножаться во внешней среде. Во внешней среде в основном размножается *E. faecium*, но он имеет меньшее эпидемиологическое значение.
- Не изменяет своих свойств во внешней среде.
- Не имеет аналогов во внешней среде.
- Устойчив к неблагоприятным воздействиям внешней среды. Энтерококк в 4 раза устойчивее к хлору по сравнению с кишечной палочкой. Это главное его достоинство. Благодаря этому признаку энтерококк используют при проверке качества хлорирования воды, а также как индикатор качества дезинфекции. Выдерживает температуру 60 °С, что позволяет применять его как показатель качества пастеризации. Устойчив к концентрациям поваренной соли 6,5–17%, поэтому может быть использован в качестве индикатора при исследовании соленых продуктов, морской воды, в которых кишечная палочка гибнет или становится атипичной. Устойчив к рН 3,0–12,0, что делает его индикатором фекального загрязнения при исследовании кислых продуктов.
- Для индикации энтерококков разработаны высокоселективные среды.

В настоящее время энтерококкометрия узаконена в международном стандарте на воду как показатель свежего фекального загрязнения. При обнаружении в воде атипичных кишечных палочек присутствие энтерококков становится главным показателем свежего фекального загрязнения. В настоящее время узаконена

энтерококкометрия молока, котлет в целях выяснения эффективности их термической обработки.

Для воды открытых водоемов определяют соотношение ФКП/ФЭ, где ФКП — фекальная кишечная палочка, ФЭ — фекальные энтерококки. При значении ФКП/ФЭ ≥10 подозревают сброс в водоем нехлорированных сточных вод. Если показатель находится в пределах 0,1–1, имеет место достаточное хлорирование сточных вод, так как ФЭ в 4 раза устойчивее к хлору, чем кишечная палочка.

**Протей**. В настоящее время показано, что бактерии рода *Proteus* встречаются в 98% случаев в выделениях кишечника человека и животных, из них в 82% случаев — *P. mirabilis*. Обнаружение протея в воде и продуктах указывает на загрязнение объектов разлагающимися субстратами и свидетельствует о крайнем санитарном неблагополучии. При обнаружении протея в пищевых продуктах их бракуют, а воду не разрешают употреблять для питья.

***Clostridium perfringens***. Следующим СПМО является *C. perfringens*. Однако у *C. perfringens* как СПМО есть свои достоинства и недостатки:

- непостоянно обнаруживается в кишечнике человека;
- длительно сохраняется во внешней среде за счет спорообразования, поэтому не свидетельствует о свежем фекальном загрязнении;
- на эти бактерии губительно действует сопутствующая микрофлора;
- споры устойчивы к концентрациям активного хлора 1,2–1,7 мг/л воды;
- *C. perfringens* может служить косвенным показателем наличия в воде энтеровирусов.

Для прорастания спор клостридий необходим температурный шок (прогревание при 75 °C в течение 15–20 мин). В МУК 4.2.1018-01 по санитарно-микробиологическому анализу питьевой воды температурная проба воды является обязательной.

Определение титра этого СПМО рекомендовано при текущем санитарном надзоре за состоянием территории. Тесты на обнаружение сульфитредуцирующих клостридий в воде предусматривают стандарты России, Румынии, США. Определение *C. perfringens* проводят в воде открытых водоемов, почве, лечебных грязях, мясных продуктах.

**Термофилы**. *Это целая группа СПМО, в основном споровых*, растущих при 55–60 °С. Обитают во внешней среде и являются показателем загрязнения навозом и компостом. При гниении навоза или компоста температура повышается выше 60 °С и термофилы бурно размножаются. О степени загрязнения судят по количеству термофилов. В России их определяют при исследовании почвы, а также в консервах как индикатор термической обработки, особенно при хранении их в условиях жаркого климата.

**Бактериофаги**. В качестве СПМО используют бактериофаги кишечной палочки — колифаги, фаги сальмонелл и шигелл. Они обнаруживаются там, где есть соответствующие бактерии, к которым эти фаги адаптированы. Фаги выживают во внешней среде более 9 мес.

Фаги ценны как показатель фекального загрязнения, особенно энтеровирусами, так как они выделяются из сточных вод с той же частотой, что и энтеровирусы. По устойчивости к хлору фаги сравнимы с энтеровирусами. Обнаружение фагов по методу Грациа несложно, вычисляют так называемые бляшкообразующие единицы — БОЕ/см$^3$, БОЕ/л.

В СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» введено определение колифагов и установлены нормы.

**Сальмонеллы**. В 30-х годах XX века У. Вильсон и Э. Блер в *качестве СПМО предложили сальмонеллы. Сальмонеллы — наиболее* распространенные микроорганизмы, вызывающие острые кишечные заболевания (ОКЗ), могут служить индикатором других ОКЗ с аналогичными патогенезом и эпидемиологией. Поступают во внешнюю среду только с фекалиями человека и животных. Размножаются в почве при наличии в ней большого количества органических веществ, однако могут размножаться даже в чистой воде. При определении сальмонелл в воде следует вычислять не только процент положительных обнаружений, но и НВЧ. По этому показателю можно оценить эпидемиологическую ситуацию.

**Синегнойная палочка**. Способна размножаться во внешней среде. Обнаруживается в фекалиях здоровых людей в 11%, у животных в 7% (*т.е. непостоянно*). Методы индикации просты, но только в отношении пигментных форм, а во внешней среде преобладают беспигментные формы, которые распознавать трудно. Обнаружи-

вается в 90% случаях в сточных водах, в больничных палатах. Наличие синегнойной палочки свидетельствует о неблагополучном санитарном состоянии лечебного учреждения. Роль ее выросла в связи с распространением антибиотикоустойчивых штаммов и появлением большого количества носителей на коже и в моче.

**Грибы рода *Candida*.** Постоянно присутствуют в организме человека: в фекалиях в 10–90% случаев, в слизи верхних дыхательных путей в 15–50%, на коже в 1–100%. Они обнаруживаются везде, где есть сахаросодержащие вещества. Первоисточниками в природе являются человек и животные. Они очень устойчивы к неблагоприятным воздействиям внешней среды даже более, чем патогенные бактерии. Их можно использовать в качестве индикаторов эффективности дезобработки.

Выше уже указывалось, что представители второй группы СПМО определяются в воздухе, молочных продуктах, воде. К ним относится α-зеленящий стрептококк (*S. salivarius*). У него есть двойники, такие, как *S. lactis*, *bovis*, *equinus*, *cremoris*. Но эти двойники редко обнаруживаются в жилых помещениях. Зеленящими могут быть и энтерококки, но они сами являются СПМО. Другим санитарно-показательным стрептококком является β-гемолитический стрептококк, который обнаруживается у 80% людей, в основном страдающих воспалительными заболеваниями верхних дыхательных путей. Он обладает гемолитическими свойствами.

Показателем санитарного неблагополучия является и золотистый стафилококк. Именно этот вид стафилококка связан с присутствием людей и некоторых животных. В среднем у здоровых людей золотистый стафилококк обнаруживается в 30% случаев, а у медицинского персонала до 96%. Этот вид стафилококка отличается длительностью выживания и устойчивостью во внешней среде. Он может быть косвенным индикатором загрязнения воздуха вирусами. Использование золотистого стафилококка как наиболее информативного СПМО рекомендовано при исследовании воздуха жилых помещений, жилых отсеков космических кораблей, подводных лодок, лечебно-профилактических учреждений.

На роль СПМО выдвигаются также антибиотикорезистентные стафилококки и микрококки, 5–6-кратное превышение указанных СПМО в воздухе больничных помещений по сравнению с воздухом внебольничных помещений следует оценивать как плохой прогностический признак.

**Бделловибрионы** предложены в качестве СПМО в 1962 г. Это аэробные грамотрицательные палочки, подвижные, имеют жгутики, размер 0,25–1,2 мкм. Являются хищниками по отношению к другим бактериям, поражают только грамотрицательные палочки. На одном из полюсов бделловибрионов есть полость, где скапливаются экзотоксин и липолитический фермент, который и растворяет клеточную стенку бактерий. Отличают их друг от друга по литической активности: одни лизируют только псевдомонады, а другие — только аэромонады. Бделловибрионы применяют для биологической очистки воды (искусственно выпускают в воду плавательных бассейнов), используют и как СПМО по загрязнению воды. В местах сброса сточных вод количество бделловибрионов достигает 3000 КОЕ/$см^3$, а дальше от сброса — 10 КОЕ/$см^3$. Выделяют бделловибрионы по методу Грация, но для постановки пробы необходимо иметь индикаторный штамм *E. coli* K-12. Количество их выражают в БОЕ/$см^3$.

**Аэромонады**. Они в больших количествах содержатся в сточных водах и обладают большой энергией размножения. Служат показателем нагрузки сточных вод на водоем и имеют такое же значение, как ОМЧ. При большой концентрации аэромонад в воде может наступить пищевое отравление.

### 4.4.1. Санитарно-микробиологическое исследование воды

В воде формируются определенные биоценозы с преобладанием микроорганизмов, адаптировавшихся к условиям местонахождения, т.е. к физико-химическим условиям, освещенности, степени растворимости кислорода и диоксида углерода, содержанию органических и минеральных веществ и т.д. Микрофлора воды представляет собой микробный планктон, играющий роль активного фактора ее самоочищения от органических отходов. Утилизация органических отходов связана с деятельностью постоянно обитающих в воде микроорганизмов, т.е. составляющих аутохтонную микрофлору. В пресных водоемах находятся различные бактерии: палочковидные (псевдомонады, аэромонады и др.), кокковидные (микрококки), извитые и нитевидные (актиномицеты). На дне водоемов, в иле увеличивается количество анаэробов. Загрязнение воды органическими веществами сопровождается увеличением бактерий, грибов и простейших. Появляется большее количество

непостоянных (аллохтонных) представителей микрофлоры воды, которые исчезают в процессе самоочищения воды.

Вода — фактор передачи возбудителей многих инфекционных заболеваний. Вместе с загрязненными ливневыми, талыми и сточными водами в озера и реки попадают представители нормальной микрофлоры человека и животных (кишечная палочка, цитробактер, энтеробактер, энтерококки, клостридии) и возбудители кишечных инфекций (брюшного тифа, паратифов, дизентерии, холеры, лептоспироза, энтеровирусных инфекций, криптоспоридиоза и др.). Некоторые возбудители могут даже размножаться в воде (холерный вибрион, легионеллы). Вода артезианских скважин практически не содержит микроорганизмов, так как последние обычно задерживаются верхними слоями почвы.

Вода океанов и морей также содержит различные микроорганизмы, в том числе архебактерии, светящиеся и галофильные (солелюбивые) бактерии, например галофильные вибрионы, поражающие моллюски и некоторые виды рыб, при употреблении которых в пищу развивается пищевая токсикоинфекция. Кроме этого отмечено большое количество нанобактерий, например *Sphingomonas*, которые проходят через фильтр с диаметром пор 0,2 мкм.

Вода абсолютно необходима для нормального функционирования организма человека, животных и растений, поскольку составляет основу внутренней среды живой материи. Тем не менее именно через воду могут передаваться самые различные инфекционные заболевания. При решении вопроса снабжения населения доброкачественной водой необходимо учитывать возможность водного пути передачи, актуального для инфекций, в частности брюшного тифа (паратифов), дизентерии, холеры, лептоспироза, туляремии, полиомиелита, вирусных гепатитов А и Е. В зависимости от предназначения вода может быть классифицирована на:

- питьевую воду централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения;
- воду подземных и поверхностных источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения;
- децентрализованную питьевую воду (при использовании колодцев, артезианских скважин и родников);
- воду водных объектов в зонах рекреации;
- воду плавательных бассейнов с пресной и морской водой;
- хозяйственно-бытовые сточные воды после обеззараживания и очистки.

Для всех видов водопользования имеется нормативно-техническая документация — Государственные стандарты (ГОСТ), Санитарные нормы и правила (СанПиНы), методические указания (МУК), методические рекомендации, информационные письма и т.д. *Нормативно-техническая документация* (НТД) *включает* гигиенические требования, нормативы качества воды и методы исследования.

Среди многочисленных нормируемых показателей особо следует выделить **микробиологические** и **паразитологические**. Косвенно данные показатели отражаются и при проведении химического анализа воды. Так, например, органические соединения азота (альбуминоидный азот) — показатель загрязнения воды органическими веществами белковой природы, в том числе и за счет сапрофитных и патогенных микроорганизмов. Ионы аммония, азотной и азотистой кислот также являются конечными продуктами распада микроорганизмов. Окисляемость воды и биохимическая потребность ее в кислороде косвенно свидетельствуют о возможном загрязнении воды патогенными микроорганизмами.

Санитарно-микробиологическое исследование воды включает определение как патогенных микроорганизмов, так и СПМО (косвенно свидетельствующих о возможном присутствии в воде и патогенных микроорганизмов). Определение патогенных микроорганизмов проводят по эпидемиологическим показаниям, а при плановых санитарно-микробиологических исследованиях воды централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения анализ включает, согласно требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01, следующие показатели (табл. 4.1).

Колифаги определяют только в системах водоснабжения из поверхностных источников перед подачей воды в распределительную сеть, то же касается и наличия цист лямблий. Содержание спор сульфитредуцирующих клостридий определяют только при оценке эффективности технологии обработки воды. В случае обнаружения ТКБ, ОКБ, колифагов или хотя бы одного из указанных показателей вновь проводят повторное экстренное исследование воды на ТКБ, ОКБ и колифаги. Параллельно проводят исследование воды на хлориды, аммонийный азот, нитраты и нитриты. Если и в повторно взятой пробе выявляются ОКБ более 2 в 100 см$^3$ и/или ТКБ, и/или колифаги, то проводят исследование на патогенные бактерии кишечной группы и/или энтеровирусы. Такое же иссле-

дование на патогенные энтеробактерии и энтеровирусы проводят по эпидемиологическим показаниям по решению территориальных центров Роспотребнадзора.

**Таблица 4.1.** СПМО в воде централизованного хозяйственно-питьевого *водоснабжения*

| Показатели | Единицы измерения | Нормативы |
|---|---|---|
| Термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ) | Число бактерий в 100 $см^3$ | Отсутствуют |
| ОКБ | Число бактерий в 100 $см^3$ | Отсутствуют |
| ОМЧ | КОЕ в 1 $см^3$ | Не более 50 |
| Колифаги | БОЕ в 100 $см^3$ | Отсутствуют |
| Споры сульфитредуцирующих клостридий | Число спор в 20 $см^3$ | Отсутствуют |
| Цисты лямблий | Число цист в 50 $см^3$ | Отсутствуют |

Примечание. Оценивая количество ОКБ и ТКБ в 100 $см^3$ воды, следует анализировать не менее 3 объемов воды (по 100 $см^3$ каждый). При оценке ОКБ и ОМЧ превышение норматива не допускается в 95% проб, отбираемых в течение года.

ТКБ входят в состав ОКБ и обладают всеми их признаками, но, в отличие от них, способны ферментировать лактозу до кислоты, альдегида и газа при 44 °С в течение 24 ч. Таким образом, ТКБ отличаются от ОКБ способностью ферментировать лактозу до кислоты и газа при более высокой температуре.

Определяемые показатели, количество и периодичность исследований зависят от типа источника водоснабжения, численности населения, обеспечиваемого водой из данной системы водоснабжения. Эти данные приведены в СанПиН 2.1.4.1074-01. В методических указаниях по санитарно-микробиологическому анализу питьевой воды (МУК 4.2.1018-01 Министерства здравоохранения РФ) регламентированы методы санитарно-микробиологического контроля качества питьевой воды.

*Общее число микроорганизмов* — это общее число видимых при двукратном увеличении мезофильных (имеющих температурный оптимум 37 °С) аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (МАФАнМ), которые способны образовывать колонии на питательном агаре при 37 °С в течение 24 ч. Для определения этого показателя в стерильную чашку Петри вносят 1 мл воды и

заливают расплавленным (температура не выше 50 °С) мясопептонным агаром, а через сутки подсчитывают количество выросших колоний.

**Определение ОКБ и ТКБ методом мембранных фильтров**

Метод основан на фильтровании определенных объемов воды через мембранные фильтры. Для этих целей используют фильтры диаметром 35 или 47 мм с диаметром пор 0,45 мкм (отечественные фильтры «Владипор» МФАС-ОС-1, МФАС-ОС-2, МФАС-МА (№ 4–6) или зарубежные *ISO* 9000 или EN 29 000). Мембранные фильтры подготавливают к анализу в соответствии с инструкциями завода-изготовителя.

**Определение ОКБ и ТКБ титрационным методом**

Метод основан на накоплении бактерий после посева определенных объемов воды в жидкие питательные среды с последующим пересевом на дифференциальную плотную среду с лактозой и идентификации колоний по культуральным и биохимическим тестам. При исследовании питьевой воды качественным методом (текущий санэпиднадзор) засевают 3 объема по 100 $см^3$. При исследовании воды с целью количественного определения ОКБ и ТКБ (повторный анализ) засевают соответственно 100, 10 и 1 $см^3$ — по 3 объема каждой серии.

### 4.4.2. Санитарно-микробиологическое исследование почвы

Почва дает приют разнообразным микроорганизмам. Так, количество только бактерий в почве достигает 10 млрд в 1 г. Микроорганизмы участвуют в почвообразовании и самоочищении почвы, в кругообороте в природе азота, углерода и других элементов. В ней, кроме бактерий, обитают грибы, простейшие и лишайники, представляющие собой симбиоз грибов с цианобактериями. На поверхности почвы микроорганизмов относительно мало из-за губительного действия УФ-лучей, высушивания и других факторов. Пахотный слой почвы толщиной 10–15 см содержит наибольшее число микроорганизмов. По мере углубления количество микроорганизмов уменьшается вплоть до их исчезновения на глубине 3–4 м. Состав микрофлоры почвы зависит от ее типа и состояния, состава растительности, температуры, влажности и т.д. Большинство почвенных микроорганизмов способны развиваться при нейтральном pH, высокой относительной влажности, температуре от 25 до 45 °С.

В почве живут спорообразующие палочки родов *Bacillus* и *Clostridium*. Непатогенные бациллы (Вас. *megaterium*. Вас. *subtilis* и др.) наряду с псевдомонадами, протеем и некоторыми другими бактериями являются аммонифицирующими, составляя группу гнилостных бактерий, осуществляющих минерализацию органических веществ. Патогенные спорообразующие палочки (возбудители сибирской язвы, ботулизма, столбняка, газовой гангрены) способны длительно сохраняться, а некоторые даже размножаться в почве (*Clostridium botulinum*). Почва является также местом обитания азотфиксирующих бактерий, усваивающих молекулярный азот (*Azotobacter*, *Azomonas*, *Mycobacterium* и др.). Азотфиксирующие разновидности цианобактерий, или сине-зеленых водорослей, применяют для повышения плодородия рисовых полей.

Представители семейства кишечных бактерий (семейство *Enterobacteriaceae)* – кишечная палочка, возбудители брюшного тифа, сальмонеллезов и дизентерии, попав в почву с фекалиями, отмирают. В чистых почвах кишечная палочка и протей встречаются редко. Обнаружение бактерий группы кишечной палочки (колиформных бактерий) в значительных количествах является показателем загрязнения почвы фекалиями человека и животных и свидетельствует об ее санитарно-эпидемиологическом неблагополучии из-за возможности передачи возбудителей кишечных инфекций. Количество простейших в почве колеблется от 500 до 500 000 на 1 г почвы. Питаясь бактериями и органическими остатками, простейшие вызывают изменения в составе органических веществ почвы. В почве находятся также многочисленные грибы, токсины которых, накапливаясь в продуктах питания человека, вызывают интоксикации – микотоксикозы и афлатоксикозы.

Результаты исследования почв учитывают при определении и прогнозе степени их опасности для здоровья и условий проживания населения в населенных пунктах (по эпидемиологическим показаниям), профилактике инфекционной и неинфекционной заболеваемости (предупредительный санитарный надзор), текущем санитарном контроле за объектами, прямо или косвенно воздействующими на окружающую среду.

При проведении текущего санитарного надзора за состоянием почвы ограничиваются кратким санитарно-микробиологическим анализом, указывающим на наличие и степень фекального загрязнения. Показатели, включенные в эту группу, также характеризуют

процессы самоочищения почвы от загрязнителей органической природы и энтеробактерий. Полный санитарно-микробиологический анализ почвы проводят в форме предупредительного санитарного надзора. По эпидемиологическим показаниям проводят индикацию патогенной микробиоты.

В лаборатории из 5 точечных проб почвы, взятых с одного участка, готовят усредненную пробу, тщательно перемешивая и растирая в стерильной фарфоровой чашке резиновым пестиком в течение 5 мин. Посторонние примеси (корни растений, камни, щепки) удаляют путем просеивания почвы через сито, которое предварительно протирают ватным тампоном, смоченным 96% этиловым спиртом. Из усредненной пробы отбирают навески (от 1 до 50–55 г в зависимости от перечня определяемых показателей) и готовят суспензию 1:10 на стерильной водопроводной воде (10 г почвы на 90 $см^3$ воды). Для десорбции микроорганизмов с поверхности почвенных частиц приготовленную почвенную суспензию встряхивают в течение 3 мин на мешалке механического диспергатора. После отстаивания суспензии в течение 30 с готовят последовательные 10-кратные разведения почвы до концентрации $10^{-4}$–$10^{-5}$ $г/см^3$.

Оценку результатов санитарно-микробиологического исследования почв проводят путем сопоставления данных, полученных на опытных и контрольных участках почв одинакового состава, расположенных в непосредственной территориальной близости. Схемы оценки санитарного состояния почвы на основании отдельных санитарно-микробиологических критериев представлены в МУ № 1446-76 (табл. 4.2).

**Таблица 4.2.** Схема оценки санитарного состояния почвы по микробиологическим показателям (по МУ № 1446-76)

| **Категории почв** | **Титр, г** | | | **Индекс термофильных микроорганизмов (число клеток/г)** |
|---|---|---|---|---|
| | **БГКП** | **нитрифицирующих бактерий** | **клостридий** | |
| Чистая | 1,0 и выше | 0,1 и выше | 0,01 и выше | 102–103 |
| Загрязненная | 0,9 и выше | 0,09–0,001 | 0,009–0,0001 | 103–105 |
| Сильно загрязненная | 0,009 и ниже | 0,0009 и ниже | 0,00009 и ниже | 105–4–106 |

В МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест» представлена схема оценки эпидемической опасности почв населенных мест. В данном документе для оценки интенсивности биологической нагрузки на почву используются такие показатели, как БГКП и индекс энтерококков, а для оценки эпидемической опасности почвы — патогенные энтеробактерии и энтеровирусы.

### 4.4.3. Исследование микробной обсемененности воздушной среды

Микробиологическое исследование воздуха предусматривает определение общего содержания микроорганизмов, а также стафилококков в 1 м$^3$ воздуха. В отдельных случаях проводят исследование воздуха на грамотрицательные бактерии, плесневые и дрожжеподобные грибы. По эпидемиологическим показаниям спектр выявляемых в воздухе возбудителей может быть расширен.

Пробы воздуха отбирают аспирационным методом с использованием аппарата Кротова. Вполне допускается использование седиментационного метода Коха. Исследованию подлежат следующие помещения ЛПУ: операционные блоки, перевязочные и процедурные кабинеты, асептические палаты (боксы), палаты отделения анестезиологии и реанимации, палаты и коридоры лечебных отделений, помещения аптек, стерилизационных и акушерско-гинекологических отделений и станций (отделений) переливания крови. Исследование воздуха методом Коха используют в исключительно редких случаях для ориентировочной оценки степени микробного загрязнения воздуха. Для определения общего количества микроорганизмов в воздухе операционных до начала работы открывают чашки с питательным агаром и устанавливают их примерно на высоте операционного стола — 1 чашку в центре и 4 в углах помещения («метод конверта») на 10 мин, а для выявления золотистого стафилококка используют чашки с желточно-солевым агаром (ЖСА) на 40 мин. Посевы инкубируют в термостате при 37 °С, сутки при комнатной температуре, затем подсчитывают количество колоний. *При этом исходят из классической формулы В.Л. Омелянского: на 100 см$^2$ поверхности питательной среды за 5 мин экспозиции оседает такое количество бактерий, которое содержится в 10 л воздуха (в 1 м$^3$ содержится 1000 л). При этом на чашках с питательным агаром не должно вырастать более*

*5 колоний микроорганизмов, а на ЖСА золотистый стафилококк не должен обнаруживаться.*

### 4.4.4. Санитарно-микробиологический контроль объектов продовольственного назначения

Пищевые продукты могут обсеменяться различными микроорганизмами, что приводит к их порче, развитию пищевых токсикоинфекций и интоксикаций, а также таких инфекций, как сибирская язва, бруцеллез, туберкулез и др. Заболевания животного, травмы или неблагоприятные условия его содержания способствуют нарушению защитных барьеров организма и транслокации (переносу) микроорганизмов в обычно стерильные ткани и органы (прижизненное обсеменение). В результате происходят обсеменение тканей забитого животного протеями, клостридиями и другими микробами, попадание при маститах в молоко стафилококков и стрептококков. Возможно и вторичное обсеменение микроорганизмами пищевых продуктов. В этом случае источником загрязнения являются объекты окружающей среды (почва, вода, транспорт и т.д.), а также больные люди и бактерионосители. При низкой температуре хранения мяса и мясных продуктов даже в замороженном мясе могут находиться микробы, способные к размножению в психрофильных условиях (псевдомонады, протей, аспергиллы, пенициллы и др.). Микробы, обитающие в мясе, вызывают его ослизнение; в нем развиваются процессы брожения и гниения, вызванные клостридиями, протеем, псевдомонадами и грибами.

Злаковые культуры, орехи в условиях повышенной влажности могут загрязняться грибами (аспергиллами, пенициллами, фузариум и др.), что служит причиной развития пищевых микотоксикозов.

Мясные блюда (студни, салаты из мяса, блюда из мясного фарша) могут явиться причиной заболеваний, связанных с размножившимися в них сальмонеллами, шигеллами, диареегенными кишечными палочками, протеем, энтеротоксигенными штаммами стафилококков, энтерококками, *Clostridium perfringens* и *Bacillus cereus*.

Молоко и молочные продукты могут быть фактором передачи возбудителей бруцеллеза, туберкулеза и шигеллеза. Возможно также развитие пищевых отравлений в результате размножения в

молочных продуктах сальмонелл, шигелл и стафилококков. Яйца, яичный порошок и меланж при эндогенном первичном инфицировании сальмонеллами яиц, особенно утиных, являются причиной сальмонеллеза.

Рыба и рыбные продукты чаще загрязняются бактериями *Clostridium botulinum* и *Vibrio parahaemolylicus* — возбудителями пищевых интоксикаций и токсикоинфекций. Эти заболевания наблюдаются и при употреблении рыбных продуктов, загрязненных большим количеством сальмонелл, протея, *Bacillus cereus*, *Clostridium perfringens.*

Овощи и фрукты могут загрязняться и обсеменяются диареегенными кишечными палочками, шигеллами, протеем, энтеропатогенными штаммами стафилококков. Соленые огурцы могут быть причиной токсикоинфекции, вызванной *Vibrio parahaemolyticus.*

Все результаты микробиологического анализа пищевых продуктов могут быть получены не ранее 48–72 ч, т.е. когда продукт уже может быть реализован. Поэтому контроль по этим показателям носит ретроспективный характер и служит целям санитарно-гигиенической оценки предприятия, производящего или реализующего пищевые продукты.

Обнаружение повышенной общей микробной обсемененности, колиформных бактерий позволяет предположить нарушение температурного режима при приготовлении и/или хранении готового продукта. Обнаружение патогенных микроорганизмов расценивают как показатель эпидемиологического неблагополучия столовой, предприятия торговли.

Нормирование микробиологических показателей безопасности пищевых продуктов осуществляется для большинства групп микроорганизмов по альтернативному принципу, т.е. нормируется масса продукта, в которой не допускаются бактерии группы кишечных палочек, большинство условно-патогенных микроорганизмов, а также патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы и *Listeria monocytogenes.* В других случаях норматив отражает количество КОЕ в 1 г ($см^3$) продукта.

В продуктах массового потребления, для которых в таблицах СанПиН 2.3.2.1078-01 гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов отсутствуют микробиологические нормативы, патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы, не допускаются в 25 г продукта.

Санитарно-бактериологическому контролю в обязательном порядке должны подвергаться объекты приготовления и реализации пищевой продукции.

Данные санитарно-микробиологического исследования дают возможность объективно оценить санитарно-гигиеническое состояние обследуемых объектов, выявить нарушения санитарного режима и оперативно проводить целенаправленные мероприятия по их устранению.

Различают несколько способов отбора проб с различного оборудования и инвентаря для микробиологического исследования: способы тампонных смывов, отпечатков, агаровой заливки. Из них наиболее часто используют способ тампонных смывов. Санитарно-микробиологический контроль основан на обнаружении в смывах БГКП — показателей фекального загрязнения исследуемых предметов. Исследования на стафилококк, патогенные бактерии семейства кишечных, определение общей микробной обсемененности проводят по показаниям. Например, взятие смывов для обнаружения стафилококков необходимо при обследованиях кондитерских цехов, молочных кухонь и пищеблоков лечебных учреждений.

Объекты санитарно-микробиологического контроля:

- смывы с рук и спецодежды работников питания (водоснабжения);
- оборудование, инвентарь, посуда и другие объекты;
- готовые блюда, кулинарные и скоропортящиеся изделия;
- сырье и полуфабрикаты по ходу технологического процесса (по эпидемиологическим показаниям);
- питьевая вода централизованного и особенно децентрализованных источников водоснабжения.

Смывы с рук персонала, занятого обработкой сырых продуктов, забирают до начала работы. Смывы доставляют в бактериологическую лабораторию в течение 2 ч. Допускаются их хранение и транспортирование не более 6 ч при 1−10 °С.

В лаборатории производят посевы смывов на среды Кесслер с лактозой или КОДА, при этом в пробирку со средой опускают тампон и переносят оставшуюся смывную жидкость. Посевы на средах Кесслер и КОДА инкубируют при 37 °С. Через 18−24 ч из всех пробирок со средой Кесслер производят высев на секторы чашек со средой Эндо, со среды КОДА высев производят только в случае изменения окраски среды (из исходной фиолетовой до

желтой или зеленой) или ее помутнения. Посевы на среде Эндо выращивают при 37 °С 18–24 ч.

Из колоний, характерных для БГКП, готовят мазки, окрашивают по Граму, микроскопируют, при необходимости дополнительно идентифицируют по общепринятым тестам для БГКП. При оценке результатов санитарно-микробиологического обследования исходят из нормативов, что в смывах, взятых с объектов продовольственного назначения, БГКП должны отсутствовать. Обнаружение БГКП в смывах с поверхностей чистых, подготовленных к работе предметов, инвентаря, оборудования, рук и санитарной одежды персонала свидетельствует о нарушении санитарного режима. В случае повторного обнаружения БГКП в значительном проценте смывов рекомендуется провести исследование смывов на наличие патогенных энтеробактерий. При этом производят посев тампона и смывной жидкости на среды обогащения — селенитовый бульон или магниевую среду (возможно использование сред Мюллера и Кауфмана). Дальнейшее исследование проводят по общепринятой методике.

**Исследование молока и молочных продуктов**

***Микрофлора молочных продуктов***

Молоко является весьма благоприятной питательной средой для развития многих микроорганизмов. После употребления в пищу инфицированного молока и молочных продуктов могут возникать такие инфекции, как брюшной тиф, дизентерия, холера, эшерихиозы, бруцеллез, туберкулез, скарлатина, ангина, Ку-лихорадка, ящур, клещевой энцефалит, сальмонеллезные токсикоинфекции, отравление стафилококковым энтеротоксином и др.

Различают специфическую и неспецифическую микрофлору молока и молочных продуктов. К **специфической микрофлоре** молока и молочных продуктов относят микробов-возбудителей молочнокислого, спиртового и пропионовокислого брожения. Микробиологические процессы за счет жизнедеятельности этих микроорганизмов лежат в основе приготовления кисломолочных продуктов (творога, кефира, простокваши, ацидофилина и др.). Бактерии молочнокислого брожения считаются **нормальной микрофлорой** молока и молочных продуктов. Главную роль при скисании молока и молочных продуктов играют молочнокислые стрептококки *S. lactis*, *S. cremaris* и др. Менее активные расы молочнокислых стрептококков (*S. citrovorus*, *S. lactis subsp. diacetylactis*) продуцируют летучие

кислоты и ароматические вещества и поэтому широко используются при получении сыров. В группу молочнокислых бактерий также входят молочнокислые палочки: *Lactobacterium bulgaricum*, *Lactobacterium casei*, *Lactobacterium acidophilus* и т.д.

Основными возбудителями спиртового брожения в молоке и молочных продуктах являются дрожжи (*Saccharomyces lactis* и др.).

**Неспецифическую микрофлору** молока составляют гнилостные бактерии (*Proteus*), аэробные и анаэробные бациллы (*B. subtilis*, *B. megatherium*, *C. putrificum*) и многие другие. Эти микроорганизмы разлагают белок молока, участвуют в молочнокислом брожении и придают молоку неприятный вкус и запах. Поражение молочнокислых продуктов плесенью (*Mucor*, *Oidium*, *Aspergillus* и др.) придает им вкус прогорклого масла. Бактерии кишечной группы, попадая в молоко, вызывают изменение вкуса и запаха молока. Микробное обсеменение молока начинается уже в вымени. В процессе дойки происходит добавочное его обсеменение с поверхности кожи вымени, с рук, из сосуда, куда оно поступает, и из воздуха помещения. Интенсивность этого добавочного обсеменения в общем зависит от того, насколько соблюдаются элементарные санитарно-гигиенические условия при получении молока. Плохие условия хранения молока также могут способствовать дальнейшему нарастанию в нем микрофлоры.

1. **Бактерицидная фаза**. Свежевыдоенное молоко, хотя и содержит уже сотни микробов в 1 $см^3$ (главным образом стафилококки и стрептококки), обладает бактерицидными свойствами за счет присутствия в нем нормальных антител, поэтому в течение некоторого периода развитие бактерий в молоке задерживается. Этот период называют бактерицидной фазой. Длительность бактерицидной фазы колеблется в пределах 2–36 ч в зависимости от физиологических особенностей животного (в раннем периоде лактации бактерицидность молока выше). Хранение молока при повышенной температуре (30–37 °С) резко сокращает продолжительность бактерицидной фазы. Такое же влияние оказывает и интенсивное добавочное обсеменение молока микробами.

После того как бактерицидная фаза закончилась, наступает развитие микрофлоры. Видовой состав ее меняется во времени под влиянием изменений биохимических свойств среды и вследствие антагонистических и симбиотических взаимоотношений между микробными видами.

2. **Фаза смешанной микрофлоры** длится около 12 ч. В этот период еще не наступает преобладания каких-либо видовых групп микробов, так как обилие питательного субстрата и пространственные возможности позволяют достаточно свободно развиваться многим видам микроорганизмов.

3. **Фаза молочнокислых стрептококков**. В этой фазе получают преобладание микроорганизмы названной группы (*S. lactis*, *S. termofilus*, *S. cremoris* и др.). Лактоза усиленно превращается ими в молочную кислоту, реакция изменяется в кислую сторону. Накопление молочной кислоты ведет в дальнейшем к отмиранию молочнокислых стрептококков и смене их более кислотоустойчивыми молочнокислыми бактериями. Это наступает через 48 ч, знаменуя начало 3-й фазы.

4. **Фаза молочнокислых палочек**. В ней господствующее положение приобретают палочковидные формы молочнокислых бактерий (*L. lactis*, *L. crusei*, *L. bulgaricum* и др.). Образующаяся кислая реакция среды приводит к угнетению роста и постепенному отмиранию других видов бактерий. К концу 3-й фазы дальнейшие возможности развития молочнокислой микрофлоры исчерпываются, а на смену приходят грибы, для которых молочная кислота служит питательным субстратом.

5. **Фаза грибковой микрофлоры**. В этот период развиваются плесени и дрожжи, жизнедеятельность которых приводит к утрате продуктом своей пищевой ценности. Дрожжи представлены главным образом видами из рода *Torula*, реже обнаруживаются некоторые виды сахаромицетов. Из плесеней встречаются молочная плесень (*Oidium lactis*), покрывающая в виде пушка поверхность простокваши и сметаны, а также аспергилловые, пеницилловые и мукоровые плесени. Действие грибковой флоры ведет к нейтрализации среды, а это делает ее вновь пригодной для бактерий. Наступает развитие гнилостных бактерий, вызывающих протеолиз казеина, и, наконец, группы анаэробных спорообразующих маслянокислых бактерий.

Деятельность сменяющейся микрофлоры прекращается только с наступлением полной минерализации всех органических веществ молока. При некоторых условиях процесс смены микробных биоценозов может отклоняться от вышеприведенной схемы. Так, молочнокислые бактерии могут быть с самого начала угнетены микробами группы кишечных палочек, если последние присут-

ствуют в большом количестве. Дрожжи могут вырабатывать заметные концентрации спирта, что имеет место в таких продуктах, как кефир (0,2–0,6%) и особенно кумыс (0,9–2,5%). Наличие спирта создает условия для последующего развития уксуснокислых бактерий, сбраживающих спирт в уксусную кислоту. Наличие в молоке антибиотиков и других ингибирующих и нейтрализующих микрофлору веществ также может замедлять молочнокислые процессы.

**Санитарно-гигиенический контроль молочных продуктов**

Кисломолочные продукты получают в основном путем внесения в молоко особых заквасок, представляющих собой чистые или смешанные культуры определенных микроорганизмов (например, при приготовлении кефира так называемые зерна кефира, при приготовлении ацидофильного молока — культура *L. acidophilum*).

Ослизнение молока вызывается *B. viscosus lactis*, *B. cloacae*, *B. aerogenes*, *S. cremoris* и др. Вкус молока при этом не изменяется. В то же время для некоторых молочнокислых продуктов тягучая консистенция является нормальной. Она достигается искусственным внесением культуры слизеобразующих штаммов молочнокислых бактерий.

При продолжительном хранении молока в условиях относительно низкой температуры молочнокислые бактерии не могут развиваться, а некоторые виды дрожжей и гнилостных бактерий находят возможность развития. Они вызывают пептонизацию белков, в результате которой молоко приобретает горький вкус (*Torula amara*, *B. fluorescens liquifaciens*, а в сгущенном молоке *Torula lactis condensis*).

Прогоркание сливок и сливочного масла обусловлено жизнедеятельностью липолитических микроорганизмов (гриба *Oidium lactis*, *B. fluorescens*, *B. liquifaciens*).

В результате того, что в молоке патогенные бактерии находят условия для обильного размножения, при употреблении зараженного молока доза попадающих внутрь микроорганизмов может оказаться огромной. Таким образом, санитарный контроль за молочной продукцией, включающий бактериологическое исследование, имеет важное профилактическое значение.

Для сохранения молока его подвергают стерилизации или пастеризации. При этом не только гибнет микрофлора молока, но и разрушаются витамины, нарушается агрегатное состояние белков и жиров и тем самым снижается питательная ценность продукта.

Эффективность пастеризации зависит от заданного температурного режима и степени микробного загрязнения молока. При очень высокой обсемененности бактериями часть микробов переживает пастеризацию, в результате чего порча молока происходит быстрее. Наибольшую опасность представляет сохранение в пастеризованном молоке патогенных энтеробактерий и энтеротоксигенных стафилококков.

В последнее время нашел применение и другой метод обработки молока — бактофугирование, позволяющее проводить освобождение молока от микроорганизмов путем обработки на специальных центрифугах.

В СанПиН 2.3.2.1078-01 нормированы следующие показатели, характеризующие санитарно-бактериологическое состояние молока и молочных продуктов: МАФАнМ, БГКП (коли-формы) и патогенные (в том числе сальмонеллы). В мороженом и ряде заквасок для кисломолочных продуктов также нормируется масса продукта, в которой не допускается содержание *S. aureus*, а также дрожжей и плесеней.

Методы микробиологического анализа предусматривают определение мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КОЕ/г) и определение БГКП.

Определение количества МАФАнМ производят по общим правилам путем посева указанных разведений в количестве 1 $см^3$ в чашки Петри с последующей заливкой плотным питательным агаром. Посевы выдерживают в термостате при 30±1 °С в течение 72 ч.

Число выросших на чашке колоний подсчитывают. Общее количество в 1 $см^3$ (в 1 г) находят по формуле:

$$X = n \times 10 m,$$

где *n* — количество сосчитанных колоний; *m* — число десятикратных разведений.

БГКП — бесспоровые грамотрицательные, аэробные и факультативно-анаэробные палочки, в основном являющиеся представителями родов *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, сбраживающие в питательной среде лактозу с образованием кислоты и газа при 37±1 °С в течение 24 ч. Объем (масса) молокопродуктов, засеваемых в среду Кесслер, представлен в табл. 4.3.

**Таблица 4.3.** Количество продукта при посеве на среду Кесслера для определения БГКП

| Наименование продукта | Засеваемый объем или масса продукта, см$^3$, г |
|---|---|
| Молоко и сливки сырые | 0,1−0,00001 |
| Молоко и сливки пастеризованные, кисломолочные продукты | 1; 0,1; 0,01 |
| Масло | 1; 0,1; 0,01 |
| Мороженое | 0,1 |
| Сыр | 0,1−0,001 |
| Творог и сметана | 0,1−0,001 |
| Молоко или сливки сгущенные с сахаром, какао и кофе со сгущенным молоком и сахаром | 0,1 |
| Молоко сухое, сливки сухие | 0,1 |

Из каждого разведения засевают по одной пробирке. При наличии газообразования в наименьшем из засеваемых объемов считают, что БГКП в нем обнаружены. Для ориентировочной характеристики микрофлоры кисломолочных продуктов дополнительным методом является микроскопия мазка, приготовленного из цельного или разведенного материала. Мазки фиксируют и окрашивают 10% метиленовым голубым. Кисломолочные продукты имеют свою специфическую микрофлору, которую используют для их приготовления (табл. 4.4).

**Таблица 4.4.** Характеристика микрофлоры кисломолочных продуктов

| Наименование продукта | Ориентировочный состав микрофлоры |
|---|---|
| Творог, сметана, сыр домашний, простокваша обыкновенная | Молочнокислые стрептококки |
| Ацидофилин | Молочнокислые стрептококки и палочки, возможно наличие дрожжей |
| Кефир | Молочнокислые стрептококки и палочки, единичные дрожжи |

На сырое молоко нормативов нет, но как косвенный показатель бактериальной обсемененности используют редуктазную пробу (ГОСТ 9225-84). Принцип метода состоит в том, что в процессе

жизнедеятельности бактерии выделяют в окружающую среду ферменты (редуктазы). Для исследования пробы на редуктазу в пробирки наливают по 1 $см^3$ рабочего раствора метиленового голубого и по 20 $см^3$ молока, закрывают, трижды переворачивают пробирки, затем помещают в водяную баню (38 °C). Изменение окраски молока фиксируют через 40 мин, 2,5 и 3,5 ч. Окончанием анализа считают момент обесцвечивания окраски молока. В зависимости от продолжительности обесцвечивания молоко относят к одному из 4 классов (табл. 4.5).

**Таблица 4.5.** Оценка редуктазной пробы

| Класс молока | Продолжительность обесцвечивания | Ориентировочное количество бактерий, КОЕ/$см^3$ молока |
|---|---|---|
| Высший | Более 3,5 ч | Менее 300 тыс. |
| I | 3,5 ч | 300–500 тыс. |
| II | 2,5 ч | 500 тыс.–4 млн |
| III | 40 мин | 4–20 млн |

Исследование для выявления *S. aureus* проводят в соответствии с ГОСТ 30347-97, а плесеней и дрожжей — с ГОСТ 10444.12-88.

В процессе получения растительного лекарственного сырья возможно его инфицирование через воду, нестерильную аптечную посуду, воздух прозводственных помещений и руки персонала. Обсеменение происходит также за счет нормальной микрофлоры растений и фитопатогенных микроорганизмов — возбудителей заболеваний растений. Микроорганизмы находятся на поверхности (на листьях, стеблях, семенах) и на корнях растений.

Микроорганизмы на поверхности растений относятся к эпифитам (от греч. *epi* — над, *phyton* — растение). Они не наносят вреда, являются антагонистами некоторых фитопатогенных микроорганизмов, растут за счет обычных выделений растений и органических загрязнений поверхности растений. Эпифитная микрофлора усиливает иммунитет растений, защищая их от фитопатогенных микроорганизмов. Наибольшее количество эпифитной микрофлоры составляют грамотрицательные палочковидные бактерии *Erwinia herbicola* (новое название *Pantoea agglomerans*), являющиеся антагонистами возбудителя мягкой гнили овощей. Обнаруживают

в норме и другие бактерии — *Pseudomonas fluorescens*, реже *Bacillus mesentericus* и небольшое количество грибов.

Состав микрофлоры растений зависит от вида, возраста растений, типа почвы и температуры окружающей среды. Нарушение поверхности растений и их семян способствует накоплению на них большого количества пыли и микроорганизмов. При повышении влажности численность эпифитных микроорганизмов возрастает, при понижении влажности — уменьшается.

Около корней растений в почве находится значительное количество микроорганизмов. Эта зона называется *ризосферой* (от греч. *rhiza* — корень, *sphaira* — шар). В ризосфере часто присутствуют псевдомонады и микобактерии, встречаются также актиномицеты, спорообразующие бактерии и грибы. Микроорганизмы ризосферы переводят различные субстраты в соединения, доступные для растений, синтезируют биологически активные соединения (витамины, антибиотики и др.), вступают в симбиотические взаимоотношения с растениями, обладают антагонистическими свойствами против фитопатогенных бактерий.

Микроорганизмы поверхности корня растений (микрофлора ризопланы) в большей степени, чем ризосфера, представлены псевдомонадами. Симбиоз мицелия грибов с корнями высших растений называют *микоризой*, т.е. грибокорнем (от греч. *mykes* — гриб, *rhiza* — корень). Микориза улучшает рост растений.

Более загрязнены микроорганизмами растения окультуренных почв, чем растения лесов и лугов. Их много появляется на растениях, растущих на полях орошения, свалках, вблизи складирования навоза, в местах выпаса скота. При этом растения могут загрязняться патогенными микроорганизмами, и при неправильной заготовке сырья являются хорошей питательной средой для размножения микроорганизмов. Высушивание растений препятствует росту в них микроорганизмов.

К фитопатогенным микроорганизмам относят бактерии, вирусы и грибы. Болезни, вызываемые бактериями, называют *бактериозами*. К бактериозам относятся различные виды гнилей, некрозы тканей, увядание растений, развитие опухолей и др. Среди возбудителей бактериозов встречаются псевдомонады, микобактерии, эрвинии, коринебактерии, агробактерии и др. Возбудители бактериозов передаются через зараженные семена, остатки больных растений, почву, воду, воздух или путем переноса насекомыми,

моллюсками, нематодами. Бактерии проникают в растения через устьица, нектарники и другие части растений, а также через небольшие повреждения. Представители рода *Erwinia* вызывают болезни типа ожога, увядания, мокрой или водянистой гнили, например *E. amylovora* — возбудитель ожога яблонь и груш, *E. carotovora* (новое название *Pectobacterium carotovorum*) — возбудитель мокрой бактериальной гнили. Псевдомонады (род *Pseudomonas*) вызывают бактериальную пятнистость (*P. syringae* и др.), при этом на листьях образуются разнообразные пятна. Поражают листья и бактерии рода *Xanthomonas*, которые, проникая в сосудистую систему растения и закупоривая ее элемент, вызывают пятнистость и гибель растения. Некоторые представители рода *Corynebacterium* и виды *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Clavibacter michihanensis* вызывают сосудистые и паренхиматозные заболевания растений. Гликопептиды этих бактерий повреждают клеточные мембраны сосудов, в результате чего происходят закупорка сосудов и гибель растения. Агробактерии рода *Agrobacterium* способствуют развитию различных опухолей у растений (корончатый галл, корень волосяной, рак стеблей), что обусловлено онкогенной плазмидой, передающейся агробактериями в растительные клетки.

*Вирусы* вызывают болезни растений в виде мозаики и желтухи. При мозаичной болезни растений появляется мозаичная (пятнистая) расцветка пораженных листьев и плодов, растения отстают в росте. Желтуха проявляется карликовостью растений, измененными многочисленными боковыми побегами, цветками и т.д.

При употреблении продуктов питания из пораженного грибами зерна могут возникать пищевые отравления — микотоксикозы, например эрготизм — заболевание, возникающее при употреблении продуктов, приготовленных из зерна, зараженного спорыньей (гриб *Claviceps purpurea*). Гриб поражает в поле колоски злаковых: образуются склероции гриба, называемые рожками. В условиях повышенной влажности, низкой температуры на вегетирующих или скошенных растениях могут развиваться грибы родов *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspeigillus* и др., вызывающие у людей микотоксикозы.

Для борьбы с фитопатогенными микроорганизмами выращивают выносливые растения, очищают и обрабатывают семена, обеззараживают почву, удаляют пораженные растения, уничтожают переносчиков возбудителей болезней, обитающих на растениях.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Отметьте представителей микрофлоры кожи человека:
1. Коринеформные бактерии.
2. Эпидермальный стафилококк.
3. Кишечная палочка.
4. Дрожжеподобные грибы.

**Б.** Отметьте бактерии, определяющие колонизационную резистентность кишечника:
1. Бифидобактерии.
2. Лактобактерии.
3. Кандида.
4. Энтерококки.
5. Кишечная палочка.

**В.** Препарат биовестин лакто состоит из бифидогенных факторов и биомассы *B. bifidum*, *L. plantarum*. Назовите группу препаратов, к которой относится этот препарат.

**Г.** Отметьте процессы, которые применяются для стерилизации:
1. Автоклавирование.
2. Пастеризация.
3. Обработка сухим жаром.
4. Облучение γ-излучением.

**Д.** Отметьте вещества, применяемые для дезинфекции:
1. Пары этиленгликоля.
2. Четвертичные аммониевые соединения.
3. Хлорная известь.
4. 90–95% этиловый спирт.

**Е.** Санитарно-показательными микроорганизмами воды являются все, кроме (выберите):
1. Общих колиформных бактерий.
2. Термотолерантных колиформных бактерий.
3. Коли-фагов.
4. Гемолитических стрептококков.

**Ж.** При оценке качества питьевой воды централизованного водоснабжения определяют следующие микробиологические показатели:
1. Общее микробное число.
2. Общие колиформные бактерии.
3. Термотолерантные колиформные бактерии.
4. Холерные вибрионы.

**З.** С помощью аппарата Кротова осуществлен посев пробы воздуха. Скорость пробоотбора 20 л/мин, время работы 5 мин. На чашке выросло 70 колоний. Каково общее микробное число воздуха?
1. 700.
2. 1400.
3. 100.

**И.** Общая бактериальная обсемененность воздуха — это суммарное количество мезофильных микроорганизмов, содержащихся в:
1. 1 $м^3$.
2. 100 $см^3$.
3. 1 $см^3$.

**К.** Укажите характер загрязнения почвы при наличии в ней большого количества энтерококков и колиформных бактерий:
1. Свежее фекальное.
2. Давнее фекальное.
3. Органическое.

**Л.** Плановое бактериологическое исследование объектов внешней среды ЛПУ не предусматривает выявление:
1. Общей микробной обсемененности.
2. Золотистого стафилококка.
3. Синегнойной палочки.
4. Микроорганизмов семейства энтеробактерий.

**М.** При текущем санитарном надзоре за предприятиями общественного питания и торговли исследование смывов проводят на присутствие:
1. Колиформных бактерий.
2. Золотистого стафилококка
3. Протеев.
4. Сальмонелл.

# Глава 5

# ГЕНЕТИКА МИКРОБОВ

## 5.1. Строение генома бактерий

Наследственная информация хранится у бактерий в форме последовательности нуклеотидов ДНК, которые определяют последовательность аминокислот в белке (строение ДНК изложено в разделе 3.1 и показано на рис. 3.1).

Каждому белку соответствует свой ген, т.е. дискретный участок на ДНК, отличающийся числом и специфичностью последовательности нуклеотидов.

Совокупность всех генов бактерий называется геномом. Размеры генома определяются количеством нуклеотидных пар оснований (н.п.). Геном бактерий имеет гаплоидный набор генов. Бактериальный геном состоит из генетических элементов, способных к самостоятельной репликации (воспроизведению), т.е. репликонов. Репликонами являются бактериальная хромосома и плазмиды.

### 5.1.1. Бактериальная хромосома

Бактериальная хромосома представлена одной двухцепочечной молекулой ДНК. Размеры бактериальной хромосомы у различных представителей домена *Procaryotae* варьируют. Например, у *E. coli* бактериальная хромосома содержит $4{,}7 \times 10^6$ н.п. На ней располагается около 4300 генов. Для сравнения: размеры ДНК вирусов составляют порядка $10^3$ н.п., дрожжей — $10^7$ н.п., а суммарная длина хромосомных ДНК человека составляет $3 \times 10^9$ н.п.

Бактериальная хромосома у *E. coli* представлена 1 кольцевой молекулой ДНК. Одну кольцевую хромосому имеет также ряд других бактерий: *Shigella spp*, *Salmonella spp*, *P. aeruginosa*, *B. subtilus*. Однако такое строение генома не является универсальным. У некоторых бактерий, в частности у *V. cholerae*, *L. interrhogans*, *Brucella spp.*, име-

ется две кольцевых хромосомы. У ряда других бактерий (*B. burgdorferi*, *Streptomyces spp.*) обнаружены линейные хромосомы.

Бактериальная хромосома формирует компактный нуклеоид бактериальной клетки. Она кодирует жизненно важные для бактериальной клетки функции.

### 5.1.2. Плазмиды бактерий

Плазмиды представляют собой двухцепочечные молекулы ДНК размером от $10^3$ до $10^6$ н.п. Они могут быть кольцевой формой и линейными. Плазмиды кодируют не основные для жизнедеятельности бактериальной клетки функции, но придающие бактерии преимущества при попадании в неблагоприятные условия существования.

Среди фенотипических признаков, сообщаемых бактериальной клетке плазмидами, можно выделить следующие:

- устойчивость к антибиотикам;
- продукцию факторов патогенности;
- способность к синтезу антибиотических веществ;
- образование колицинов;
- расщепление сложных органических веществ;
- образование ферментов рестрикции и модификации.

Репликация плазмид происходит независимо от хромосомы с участием того же набора ферментов, который осуществляет репликацию бактериальной хромосомы (см. раздел 3.1.7 и рис. 3.5).

Некоторые плазмиды находятся под строгим контролем. Это означает, что их репликация сопряжена с репликацией хромосомы так, что в каждой бактериальной клетке присутствует одна или, по крайней мере, несколько копий плазмид.

Число копий плазмид, находящихся под слабым контролем, может достигать от 10 до 200 на бактериальную клетку.

Для характеристики плазмидных репликонов их принято разбивать на группы совместимости. Несовместимость плазмид связана с неспособностью двух плазмид стабильно сохраняться в одной и той же бактериальной клетке. Несовместимость свойственна тем плазмидам, которые обладают высоким сходством репликонов, поддержание которых в клетке регулируется одним и тем же механизмом.

Плазмиды, которые могут обратимо встраиваться в бактериальную хромосому и функционировать в виде единого репликона, называются *интегративными* или *эписомами*.

Плазмиды, способные передаваться из одной клетки в другую, иногда даже принадлежащую иной таксономической единице, называются *трансмиссивными (конъюгативными)* Трансмиссивность присуща лишь крупным плазмидам, имеющим *tra*-оперон, в который объединены гены, ответственные за перенос плазмиды. Эти гены кодируют половые пили, которые образуют мостик с клеткой, не содержащей трансмиссивную плазмиду, по которой плазмидная ДНК передается в новую клетку. Этот процесс называется *конъюгацией* (подробно он будет рассмотрен в разделе 5.4.1). Бактерии, несущие трансмиссивные плазмиды, чувствительны к «мужским» нитевидным бактериофагам.

Мелкие плазмиды, не несущие *tra*-гены, не могут передаваться сами по себе, но способны к передаче в присутствии трансмиссивных плазмид, используя их аппарат конъюгации. Такие плазмиды называются *мобилизуемыми,* а сам процесс — *мобилизацией* нетрансмиссивной плазмиды.

Особое значение в медицинской микробиологии имеют плазмиды, обеспечивающие устойчивость бактерий к антибиотикам, которые получили название R-плазмид (от англ. *resistance* — противодействие), и плазмиды, обеспечивающие продукцию факторов патогенности, способствующих развитию инфекционного процесса в макроорганизме. R-плазмиды содержат гены, детерминирующие синтез ферментов, разрушающих антибактериальные препараты (например, антибиотики). В результате наличия такой плазмиды бактериальная клетка становится устойчивой (резистентной) к действию целой группы лекарственных веществ, а иногда и к нескольким препаратам. Многие R-плазмиды являются трансмиссивными, распространяясь в популяции бактерий, делая ее недоступной к воздействию антибактериальных препаратов. Бактериальные штаммы, несущие R-плазмиды, очень часто являются этиологическими агентами внутрибольничных инфекций.

Плазмиды, детерминирующие синтез факторов патогенности, в настоящее время обнаружены у многих бактерий, являющихся возбудителями инфекционных заболеваний человека. Патогенность возбудителей шигеллезов, иерсиниозов, чумы, сибирской язвы, иксодового бореллиоза, кишечных эшерихиозов связана с наличием у них и функционированием плазмид патогенности.

Некоторые бактериальные клетки содержат плазмиды, детерминирующие синтез бактерицидных по отношению к другим бактери-

ям веществ. Например, некоторые *E. coli* владеют *Col*-плазмидой, определяющей синтез колицинов, обладающих микробоцидной активностью по отношению к колиформным бактериям. Бактериальные клетки, несущие такие плазмиды, обладают преимуществами при заселении экологических ниш.

Плазмиды используются в практической деятельности человека, в частности в генной инженерии при конструировании специальных рекомбинантных бактериальных штаммов, вырабатывающих в больших количествах биологически активные вещества (см. главу 6).

### 5.1.3. Подвижные генетические элементы

Подвижные генетические элементы обнаружены в составе бактериального генома как в бактериальной хромосоме, так и в плазмидах. К подвижным генетическим элементам относятся вставочные последовательности и транспозоны.

Вставочные *(инсерционные) последовательности* — IS-элементы (от англ. *insertion sequences*) — это участки ДНК, способные как целое перемещаться из одного участка репликона в другой, а также между репликонами. IS-элементы имеют размеры 1000 н.п. и содержат лишь те гены, которые необходимы для их собственного перемещения — транспозиции: ген, кодирующий фермент транспозазу, обеспечивающую процесс исключения IS-элемента из ДНК и его интеграцию в новый локус, и ген, детерминирующий синтез репрессора, который регулирует весь процесс перемещения. Эти гены по флангам окружены ***инвертированными повторами***, которые служат сайтами рекомбинации, сопровождающей перемещения вставочной последовательности при участии транспозиционных ферментов, в частности транспозаз.

Инвертированные повторы узнает фермент транспозаза (рис. 5.1), которая осуществляет одноцепочечные разрывы цепей ДНК, расположенных по обе стороны от подвижного элемента. Оригинальная копия IS-элемента остается на прежнем месте, а ее реплицированный дубликат перемещается на новый участок.

Перемещение подвижных генетических элементов принято называть репликативной или незаконной рекомбинацией. Однако, в отличие от бактериальной хромосомы и плазмид, подвижные генетические элементы не являются самостоятельными репликонами,

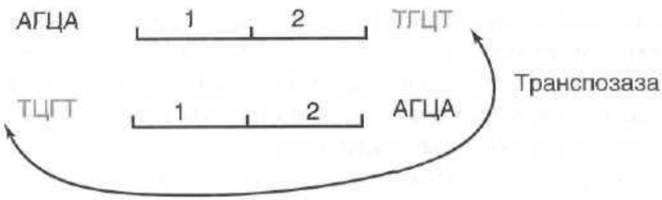



**Рис. 5.1.** Схема строения IS-элемента: 1 — ген репрессора; 2 — ген транспозазы; стрелками указаны места разрывов

так как их репликация — составной элемент репликации ДНК репликона, в составе которого они находятся.

IS-элементы различаются по размеру, типу и количеству инвертированных повторов.

*Транспозоны* — это сегменты ДНК, обладающие теми же свойствами, что и IS-элементы, но имеющие в своем составе структурные гены, т.е. гены, обеспечивающие синтез молекул, обладающих специфическим биологическим свойством, например токсичностью, или обеспечивающих устойчивость к антибиотикам.

Перемещение подвижных генетических элементов по репликону или между репликонами вызывает:

- инактивацию генов тех участков ДНК, куда они, переместившись, встраиваются;
- образование повреждений генетического материала;
- слияние репликонов, т.е. встраивание плазмиды в хромосому;
- распространение генов в популяции бактерий, что может приводить к изменению биологических свойств популяции, смене возбудителей инфекционных заболеваний, а также способствует эволюционным процессам среди микробов.

### 5.1.4. Интегроны

Помимо плазмид и подвижных генетических элементов, у бактерий существует еще одна система, способствующая распространению генов, — система интегронов. *Интегроны* являются системой захвата малых элементов ДНК, называемых *генными кассетами*, посредством сайтспецифической рекомбинации и их экспрессии.

Интегрон состоит из консервативного участка, расположенного на 5' конце, который содержит ген, кодирующий фермент интегразу, сайт рекомбинации *att* и промотор P (рис. 5.2).

Кассета может существовать в двух формах: линейной, когда кассета интегрирована в интегрон, и в виде маленькой кольцевой двухцепочечной ДНК. Кассеты имеют размеры от 260 до 1500 н.п. Они содержат преимущественно 1 ген антибиотикорезистентности и сайт рекомбинации, состоящий из 59 пар оснований, расположенный на 3'-конце.

Интеграза осуществляет рекомбинацию между участком 59 н.п. кассеты и участком *att* интегрона, включая гены кассеты в интегрон в такой ориентации, чтобы они могли экспрессироваться с промотора P интегрона. Интеграция кассет в интегрон является обратимым процессом. Интегроны могут располагаться как на хромосоме, так и на плазмидах. Поэтому возможно перемещение кассет с одного интегрона на другой как в пределах одной бактериальной клетки, так и по популяции бактерий. Один интегрон может захватывать несколько кассет антибиотикорезистентности. Изменения

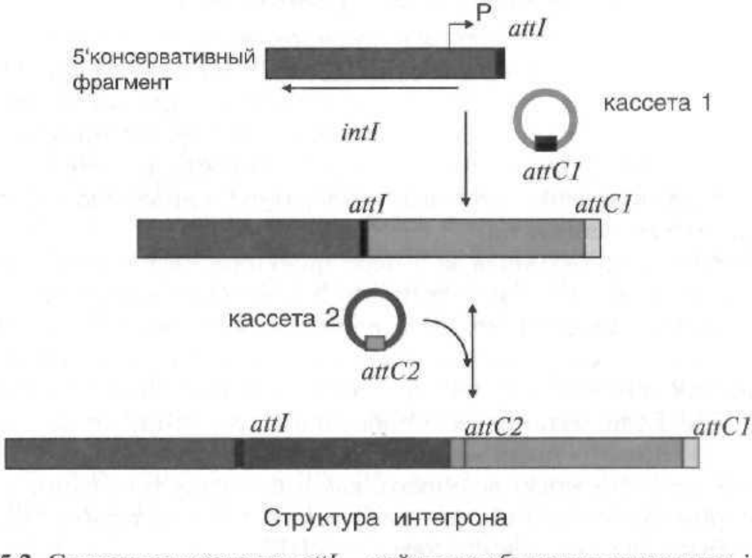



**Рис. 5.2.** Строение интегрона: *attI* — сайт рекомбинации интегрона; *intI* — ген, кодирующий интегразу; P — промотор; *attC* — сайты рекомбинации кассет антибиотикорезистентности

бактериального генома, а следовательно, и свойств бактерий могут происходить в результате мутаций и рекомбинаций.

### 5.1.5. Острова патогенности

В геноме патогенных бактерий (см. главу 8) имеются участки ДНК протяженностью не менее 10 000 пар нуклеотидов, которые отличаются от основного генома составом Г—Ц-пар нуклеотидных оснований. Эти участки ответственны за синтез факторов патогенности, которые обеспечивают развитие патологического процесса в организме хозяина, поэтому были названы островами патогенности. Острова патогенности обычно по флангам имеют прямые повторы последовательностей ДНК или IS-элементы. Некоторые имеют в своем составе участки, характерные для сайтов интеграции, расположенных вблизи генов тРНК. Большинство островов патогенности локализовано на хромосоме бактерий (*Salmonella*), но также они могут находиться в составе плазмид (*Shigella*) и фаговых ДНК (*V. cholerae* O1, O139).

## 5.2. Мутации у бактерий

Мутации — это изменения в последовательности отдельных нуклеотидов ДНК, которые фенотипически ведут к таким проявлениям, как изменения морфологии бактериальной клетки, возникновение потребностей в факторах роста, например в аминокислотах, витаминах, т.е. ауксотрофности, к устойчивости к антибиотикам, изменению чувствительности к температуре, снижению вирулентности (аттенуация) и т.д.

Мутация, приводящая к потере функции, называется прямой мутацией. У мутантов может произойти восстановление исходных свойств, т.е. реверсия (от англ. *reverse* — обратный). Если происходит восстановление исходного генотипа, то мутация, восстанавливающая генотип и фенотип, называется обратной или прямой *реверсией*. Если мутация восстанавливает фенотип, не восстанавливая генотип, то такая мутация называется *супрессорной*. Супрессорные мутации могут возникать как в пределах того самого гена, в котором произошла первичная мутация, так и в других генах или могут быть связаны с мутациями в тРНК.

По протяженности изменений повреждения ДНК различают мутации точечные, когда повреждения ограничиваются одной

парой нуклеотидов, и протяженные или аберрации. В последнем случае могут наблюдаться выпадения нескольких пар нуклеотидов, которые называются *делецией,* добавление нуклеотидных пар, т.е. *дупликации,* перемещения фрагментов хромосомы, *транслокации* и перестановки нуклеотидных пар — *инверсии.*

Мутации могут быть *спонтанными, т.е.* возникающими самопроизвольно, без воздействия извне, и *индуцированными.*

*Точечные спонтанные* мутации возникают в результате ошибок при репликации ДНК, что связано с таутомерным перемещением электронов в азотистых основаниях.

Тимин (Т), например, обычно находится в кетоформе, в которой он способен образовывать водородные связи с аденином (А). Но если тимин во время спаривания оснований при репликации ДНК переходит в енольную форму, то он спаривается с гуанином. В результате в новой молекуле ДНК на месте, где раньше стояла пара А—Т, появляется пара Г—Ц.

Спонтанные хромосомные аберрации возникают вследствие перемещения подвижных генетических элементов. Индуцированные мутации появляются под влиянием внешних факторов, которые называются *мутагенами.* Мутагены бывают физическими (УФ-лучи, $\gamma$-радиация), химическими (аналоги пуриновых и пиримидиновых оснований, азотистая кислота и ее аналоги и другие соединения) и биологическими — транспозоны.

Аналоги пуриновых и пиримидиновых оснований, например 2-аминопурин, 5-бромурацил, включаются в нуклеотиды, а следовательно, и в ДНК, но при этом они значительно чаще в силу таутомерных превращений спариваются с «неправильными» партнерами, в результате вызывая замену пурина другим пурином (А—Г) или пиримидина другим пиримидином (Т—Ц). Замена пурина другим пурином, а пиримидина другим пиримидином называется *транзицией.*

Азотистая кислота и ее аналоги вызывают дезаминирование азотистых оснований, результатом чего являются ошибки при спаривании и как следствие возникновение транзиции. Аденин в результате дезаминирования превращается в гипоксантин, который спаривается с цитозином, что приводит к возникновению транзиции АТ—ГЦ. Гуанин же при дезаминировании превращается в ксантин, который по-прежнему спаривается с цитозином; таким образом, дезаминирование гуанина не сопровождается мутацией.

*Акридин и профлавин внедряются между соседними основаниями* цепи ДНК, вдвое увеличивая расстояние между ними. Это пространственное изменение при репликации может привести как к утрате нуклеотида, так и к включению дополнительной нуклеотидной пары, что приводит к *сдвигу рамки считывания* тРНК. Начиная с того места, где произошло выпадение или включение нуклеотида, информация считывается неправильно.

*УФ-облучение затрагивает преимущественно пиримидиновые* основания, при этом два соседних остатка тимина ДНК могут оказаться ковалентно связанными.

На бактериях, подвергнутых УФ-облучению, было показано, что повреждения, вызванные облучением в бактериальных ДНК, могут частично исправляться благодаря наличию *репарационных* систем. У различных бактерий имеется несколько типов репарационных систем. Один тип репарации протекает на свету, он связан с деятельностью фотореактивирующегося фермента, который расщепляет *тиминовый димер. При темновой репарации* дефектные участки цепи ДНК удаляются и образовавшаяся брешь достраивается при помощи ДНК-полимеразы на матрице сохранившейся цепи и соединяется с цепью лигазой.

## 5.3. Рекомбинация у бактерий

Генетическая рекомбинация — это взаимодействие между двумя ДНК, обладающими различными генотипами, которое приводит к образованию рекомбинантной ДНК, сочетающей гены обоих родителей.

Особенности рекомбинации у бактерий определяет отсутствие полового размножения и мейоза, в процессе которых у высших организмов происходят рекомбинация, гаплоидный набор генов. В процессе рекомбинации бактерии условно делятся на клетки-доноры, которые передают генетический материал, и клетки-реципиенты, которые воспринимают его. В клетку-реципиент проникает не вся, а только часть хромосомы клетки-донора, что приводит к формированию неполной зиготы — *мерозиготы.* В результате рекомбинации в мерозиготе образуется только один рекомбинант, генотип которого представлен в основном генотипом реципиента, с включенным в него фрагментом хромосомы донора. Реципрокные рекомбинанты не образуются.

По молекулярному механизму генетическая рекомбинация у бактерий делится на гомологичную, сайтспецифическую и незаконную.

### 5.3.1. Гомологичная рекомбинация

При гомологичной рекомбинации в процессе разрыва и воссоединения ДНК происходит обмен между участками ДНК, обладающими высокой степенью гомологии. Процесс гомологичной рекомбинации находится под контролем генов, объединенных в *REC*-систему, состоящую из генов *recA*, *B*, *C*, *D*. Продукты этих генов производят расплетание нитей ДНК и их переориентацию с образованием полухиазмы, структуры Холидея, а также разрезают структуру Холидея для завершения процесса рекомбинации.

### 5.3.2. Сайтспецифическая рекомбинация

Этот тип рекомбинации не зависит от функционирования генов *recA*, *B*, *C*, *D*, не требует протяжных участков гомологии ДНК, но для протекания которой необходимы строго определенные последовательности ДНК и специальный ферментативный аппарат, которые специфичны для каждого конкретного случая. Примером этого типа рекомбинации является встраивание плазмиды в хромосому бактерий, которое происходит между идентичными IS-элементами хромосомы и плазмиды, интеграция ДНК фага лямбда в хромосому *E. coli*. Сайтспецифическая рекомбинация, происходящая в пределах одного репликона, участвует также в переключении активности генов. Например, у сальмонелл следствием этого процесса являются фазовые вариации жгутикового Н-антигена.

### 5.3.3. Незаконная или репликативная рекомбинация

Незаконная или репликативная рекомбинация не зависит от функционирования генов *recA*, *B*, *C*, *D*. Примером ее является транспозиция подвижных генетических элементов по репликону или между репликонами, при этом, как уже было отмечено в разделе 5.1.3, транспозиция подвижного генетического элемента сопровождается репликацией ДНК.

Рекомбинация у бактерий является конечным этапом передачи генетического материала между бактериями, которая осуществляется тремя механизмами: конъюгацией (при контакте бактерий,

одна из которых несет конъюгативную плазмиду), трансдукцией (при помощи бактериофага), трансформацией (при помощи высокополимеризованной ДНК).

## 5.4. Передача генетической информации у бактерий

### 5.4.1. Конъюгация

Передача генетического материала от клетки-донора в клетку-реципиент путем непосредственного контакта клеток называется конъюгацией, которая впервые была обнаружена Дж. Ледербергом и Э. Тейтумом в 1946 г.

Необходимым условием для конъюгации является наличие в клетке-доноре трансмиссивной плазмиды. Трансмиссивные плазмиды кодируют половые пили, образующие конъюгационную трубочку между клеткой-донором и клеткой-реципиентом, по которой плазмидная ДНК передается в новую клетку. Механизм передачи плазмидной ДНК из клетки в клетку заключается в том, что специальный белок, кодируемый *tra*-опероном, узнает определенную последовательность в ДНК плазмиды (называемую от англ. *origin* — начало), вносит в эту последовательность одноцепочечный разрыв и ковалентно связывается с 5'-концом. Затем цепь ДНК, с которой связан белок, переносится в клетку-реципиент, а неразорванная комплементарная цепь остается в клетке-доноре. Клеточный аппарат синтеза ДНК достраивает одиночные цепи и в доноре, и в реципиенте до двухцепочечной структуры. Белок, связанный с 5'-концом перенесенной цепи, способствует замыканию плазмиды в реципиентной клетке в кольцо. Этот процесс представлен на рис. 5.3, а на примере переноса в реципиентную клетку плазмиды F (от англ. *fertility* — плодовитость), которая является как трансмиссивной, так и интегративной плазмидой. Клетки-доноры, обладающие F-фактором, обозначаются как $F^+$-клетки, а клетки-реципиенты, не имеющие F-фактора, обозначаются как $F^-$-клетки. Если F-фактор находится в клетке-доноре в автономном состоянии, то в результате скрещивания $F^+ \times F^-$ клетка-реципиент приобретает донорские свойства.

Если F-фактор или другая трансмиссивная плазмида встраиваются в хромосому клетки-донора, то плазмида и хромосома начинают функционировать в виде единого трансмиссивного репликона, что делает возможным перенос бактериальных генов в бесплаз-

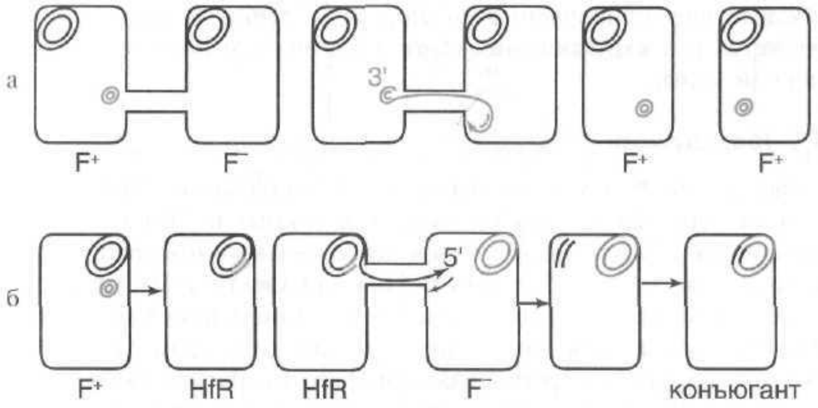



**Рис. 5.3.** Схема конъюгации у бактерий: а — передача F плазмиды из $F^+$- в $F^-$-клетку; б — передача бактериальной хромосомы *Hfr* × $F^-$

мидную клетку-реципиент, т.е. процесс конъюгации. Штаммы, в которых плазмида находится в интегрированном состоянии, переносят свои хромосомные гены бесплазмидным клеткам с высокой частотой и поэтому называются *Hfr* (от англ. *high frequency* of *recombination* — высокая частота рекомбинации) (рис. 5.3, б).

Процесс переноса хромосомных генов в случае скрещивания *Hfr* × $F^-$ всегда начинается с расщепления ДНК в одной и той же точке — в месте интеграции F-фактора или другой трансмиссивной плазмиды. Одна нить донорской ДНК передается через конъюгационный мостик в реципиентную клетку. Процесс сопровождается достраиванием комплементарной нити до образования двунитевой структуры. Перенос хромосомных генов при конъюгации всегда имеет одинаковую направленность, противоположную встроенной плазмиде. Сама трансмиссивная плазмида передается последней. Переданная в реципиентную клетку и достроенная до двунитевой структуры нить ДНК донора рекомбинирует с гомологичным участком реципиентной ДНК с образованием стабильной генетической структуры. Из-за хрупкости конъюгационного мостика половой фактор редко передается в клетку-реципиент, поэтому образовавшийся рекомбинант донорскими функциями, как правило, не обладает.

Вследствие направленности передачи генов конъюгация используется для картирования генома бактерий и построения генетической карты.

### 5.4.2. Трансдукция

Трансдукцией называют передачу бактериальной ДНК посредством бактериофага. Этот процесс был открыт в 1951 г. Н. Циндером и Дж. Ледербергом. В процессе репликации фага внутри бактерий (см. раздел 3.3) фрагмент бактериальной ДНК проникает в фаговую частицу и переносится в реципиентную бактерию во время фаговой инфекции. Существует два типа трансдукции: *общая* трансдукция — перенос бактериофагом сегмента любой части бактериальной хромосомы — происходит вследствие того, что в процессе фаговой инфекции бактериальная ДНК фрагментируется, и фрагмент бактериальной ДНК того же размера, что и фаговая ДНК, проникает в фаговую головку, формируя дефектную фаговую частицу. Этот процесс происходит с частотой приблизительно 1 на 1000 фаговых частиц (рис. 5.4, а). При инфицировании клетки-реципиента дефектной фаговой частицей ДНК клетки-донора «впрыскивается» в нее и рекомбинирует гомологичной рекомбинацией с гомологичным участком хромосомы-реципиента с образованием стабильного рекомбинанта. Этим типом трансдукции обладают Р-фаги. *Специфическая* трансдукция наблюдается в том случае, когда фаговая ДНК интегрирует в бактериальную хромосому с образованием профага. В процессе исключения ДНК-фага из бактериальной хромосомы в результате случайного процесса захватывается прилегающий к месту включения фаговой ДНК фрагмент бактериальной хромосомы, становясь дефектным фагом (рис. 5.4, б). Так как большинство умеренных бактериофагов интегрирует в бактериальную хромосому в специфических участках, для таких бактериофагов характерен перенос в клетку-реципиент определенного участка бактериальной ДНК клетки-донора. ДНК дефектного фага рекомбинирует с ДНК клетки-реципиента сайт-специфической рекомбинацией. Рекомбинант становится меродиплоидом по привнесенному гену. В частности, бактериофаг передает специфической трансдукцией *gal*-ген у *E. coli*.




**Рис. 5.4.** Схема трансдукции: а — неспецифическая (общая); б — специфическая

### 5.4.3. Трансформация

Феномен трансформации впервые был описан в 1928 г. Ф. Гриффитсом, обнаружившим превращение бескапсульного R-штамма пневмококков (*Streptococcus pneumoniae*) в штамм, образующий капсулу S-формы. Гриффитс ввел мышам одновременно небольшое количество авирулентных R-клеток и убитых нагреванием S-клеток. R-клетки были получены от штамма, капсульное вещество которого принадлежало к типу S II, а убитые нагреванием S-штаммы — к типу S III. Из крови погибших мышей были выделены вирулентные пневмококки с капсулой S III.

В 1944 г. О. Эвери, К. Мак-Леод, М. Мак-Карти установили природу трансформирующего фактора, показав, что ДНК, экстрагированная из инкапсулированных пневмококков, может трансформировать некапсулированные пневмококки в инкапсулированную форму. Таким образом, было доказано, что именно ДНК является носителем генетической информации.

Процесс трансформации может самопроизвольно происходить в природе у некоторых видов бактерий, *B. subtilis*, *H. influenzae*, *S. pneumoniae*, когда ДНК, выделенная из погибших клеток, захватывается реципиентными клетками. Процесс трансформации зависит от компетентности клетки-реципиента и состояния донорской трансформирующей ДНК. *Компетентность* — это спо-

собность бактериальной клетки поглощать ДНК. Она зависит от присутствия особых белков в клеточной мембране, обладающих специфическим аффинитетом к ДНК. Состояние компетентности у грамположительных бактерий связано с определенными фазами кривой роста. Состояние компетенции у грамотрицательных бактерий приходится создавать искусственным путем, подвергая бактерии температурному или электрошоку.

Трансформирующей активностью обладает только двунитевая высокоспирализованная молекула ДНК. Это связано с тем, что *в клетку-реципиент проникает только одна нить ДНК, тогда как* другая — на клеточной мембране — подвергается деградации с высвобождением энергии, которая необходима для проникновения в клетку сохранившейся нити. Высокая молекулярная масса трансформирующей ДНК увеличивает шанс рекомбинации, так как внутри клетки трансформирующая нить ДНК подвергается воздействию эндонуклеаз. Интеграция с хромосомой требует наличия гомологичных с ней участков у трансформирующей ДНК. Рекомбинация происходит на одной нити, в результате чего образуется гетеродуплексная молекула, одна нить которой имеет генотип *реципиента, а другая — рекомбинантный генотип.* Рекомбинантные трансформанты формируются только после цикла репликации (рис. 5.5).

В настоящее время этот метод является основным методом генной инженерии, используемым при конструировании рекомбинантных штаммов с заданным геномом.

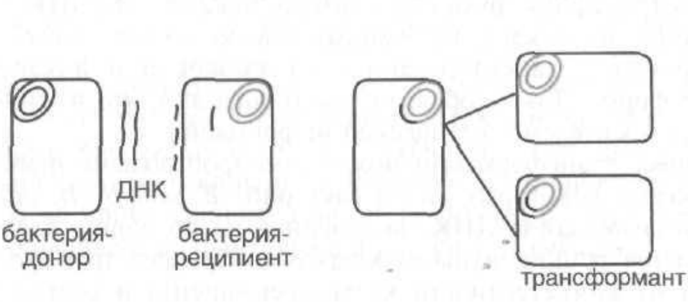



**Рис. 5.5.** Схема трансформации

## 5.5. Особенности генетики вирусов

Особенность строения вирусного генома заключается в том, что *наследственная информация может быть записана как на ДНК, так и на РНК* в зависимости от типа вируса.

Мутации у вирусов могут возникать спонтанно в процессе репликации нуклеиновой кислоты вируса, а также под влиянием тех же внешних факторов и мутагенов, что и у бактерий.

Фенотипически мутации вирусного генома проявляются изменениями антигенной структуры, неспособностью вызывать продуктивную инфекцию в чувствительной клетке, чувствительностью продуктивного цикла к температуре, а также изменением формы и размера бляшек, которые образуют вирусы в культуре клеток под агаровым покрытием (см. главу 3.2).

*Свойства вирусов могут изменяться при одновременном заражении* несколькими вирусами чувствительной клетки, причем изменения свойств при таких условиях могут происходить в результате как обмена между материалами нуклеиновых кислот, принадлежащих разным вирусам (генетическая рекомбинация и генетическая реактивация), так и процессов, не сопровождающихся обменом генетического материала (комплементация и фенотипическое смешивание).

*Генетическая рекомбинация* встречается чаще у ДНК-содержащих вирусов. Среди РНК-содержащих вирусов она наблюдается у тех из них, которые обладают фрагментированным геномом, например у *вируса гриппа. При рекомбинации происходит обмен* между гомологичными участками генома.

*Генетическая реактивация* наблюдается между геномами родственных вирусов, имеющих мутации в разных генах. В результате перераспределения генетического материала формируется полноценный дочерний геном.

*Комплементация* встречается в том случае, когда один из двух вирусов, инфицирующих клетку, в результате мутации синтезирует нефункциональный белок. Немутантный вирус, синтезируя полноценный белок, восполняет его отсутствие у мутантного вируса.

*Фенотипическое смешивание* наблюдается в том случае, если при смешанном заражении чувствительной клетки двумя вирусами часть потомства приобретает фенотипические признаки, присущие двум вирусам, при сохранении неизменности генотипа.

## 5.6. Применение генетических методов в диагностике инфекционных болезней

Генетические методы применяются в практических целях как для обнаружения микроба в исследуемом материале без выделения чистой культуры, так и для определения таксономического положения микроба и проведения внутривидовой идентификации.

### 5.6.1. Методы, используемые для внутривидовой идентификации бактерий

Рестрикционный анализ основан на применении ферментов, носящих название *рестриктаз*. Рестриктазы представляют собой эндонуклеазы, которые расщепляют молекулы ДНК, разрывая фосфатные связи не в произвольных местах, а в определенных последовательностях нуклеотидов. Особое значение для методов молекулярной генетики имеют рестриктазы, которые узнают последовательности, обладающие центральной симметрией и считывающиеся одинаково в обе стороны от оси симметрии. Точка разрыва ДНК может или совпадать с осью симметрии, или быть сдвинута относительно нее.

В настоящее время из различных бактерий выделено и очищено более 175 различных рестриктаз, для которых известны сайты (участки) узнавания (рестрикции). Выявлено более 80 различных типов сайтов, в которых может происходить разрыв двойной спирали ДНК. В геноме конкретной таксономической единицы находится строго определенное (генетически задетерминированное) число участков узнавания для определенной рестриктазы. Если выделенную из конкретного микроба ДНК обработать определенной рестриктазой, то это приведет к образованию строго определенного количества фрагментов ДНК фиксированного размера. Размер каждого типа фрагментов можно узнать с помощью электрофореза в агарозном геле: мелкие фрагменты перемещаются в геле быстрее, чем более крупные фрагменты, и длина их пробега больше. Гель окрашивают бромистым этидием и фотографируют в УФ-излучении. Таким способом можно получить рестрикционную карту определенного вида микробов.

Сопоставляя карты рестрикции ДНК, выделенных из различных штаммов, можно определить их генетическое родство, выявить принадлежность к определенному виду или роду, а также обнару-

жить участки, подвергнутые мутациям. Этот метод используется также как начальный этап метода определения последовательности нуклеотидных пар (секвенирования) и метода молекулярной гибридизации.

**Определение плазмидного профиля бактерий**. Плазмидный профиль позволяет произвести внутривидовую идентификацию бактерий. Для этого из бактериальной клетки выделяют плазмидную ДНК, которую разделяют электрофорезом в агарозном геле для определения количества и размеров плазмид.

**Риботипирование**. Последовательность нуклеотидных оснований в оперонах, кодирующих рРНК, характеризуется наличием как консервативных участков, которые подверглись малым изменениям в процессе эволюции и имеют сходное строения у различных бактерий, так и вариабельных последовательностей, которые родо- и видо-специфичны и являются маркерами при генетической идентификации. Эти опероны представлены на бактериальной хромосоме в нескольких копиях. Фрагменты ДНК, полученные после обработки ее рестриктазами, содержат последовательности генов рРНК, которые могут быть обнаружены методом молекулярной гибридизации с меченой рРНК соответствующего вида бактерий. Количество и локализация копий оперонов рРНК и рестрикционный состав сайтов как внутри рРНК-оперона, так и по его флангам варьируют у различных видов бактерий. На основе этого свойства построен метод *риботипирования,* который позволяет производить мониторинг выделенных штаммов и определение их вида. В настоящее время риботипирование проводится в автоматическом режиме в специальных приборах.

### 5.6.2. Методы, используемые для обнаружения микроба без выделения его в чистую культуру

Метод молекулярной гибридизации позволяет выявить степень сходства различных ДНК. Применяется при идентификации микробов для определения их точного таксономического положения, а также для обнаружения микроба в исследуемом материале без его выделения в чистую культуру. Метод основан на способности двухцепочечной ДНК при повышенной температуре (90 °С) в щелочной среде денатурировать, т.е. расплетаться на две нити, а при понижении температуры на 10 °С вновь восстанавливать исходную двухцепочечную структуру. Метод требует наличия молекулярного зонда.

*Зондом* называется одноцепочечная молекула нуклеиновой кислоты, меченная радиоактивными нуклидами, ферментом, флюорохромным красителем, с которой сравнивают исследуемую ДНК.

Для проведения молекулярной гибридизации исследуемую ДНК расплетают указанным выше способом, одну нить фиксируют на специальном фильтре, который затем помещают в раствор, содержащий зонд. Создаются условия, благоприятные для образования двойных спиралей. При наличии комплементарности между зондом и исследуемой ДНК они образуют между собой двойную спираль, наличие которой фиксируют методами в зависимости от типа метки зонда: подсчетом радиоактивности, иммуноферментным анализом (ИФА) или денситометрией.

**Определение наличия микроба в исследуемом материале при помощи микрочипа**

Микрочип представляет стеклянную пластинку, с которой связано от 100 до 1000 молекулярных ДНК-зондов, которые представляют последовательность нуклеотидов, специфичных для данной таксономической единицы, локализованных в определенных участках (рис. 5.6).

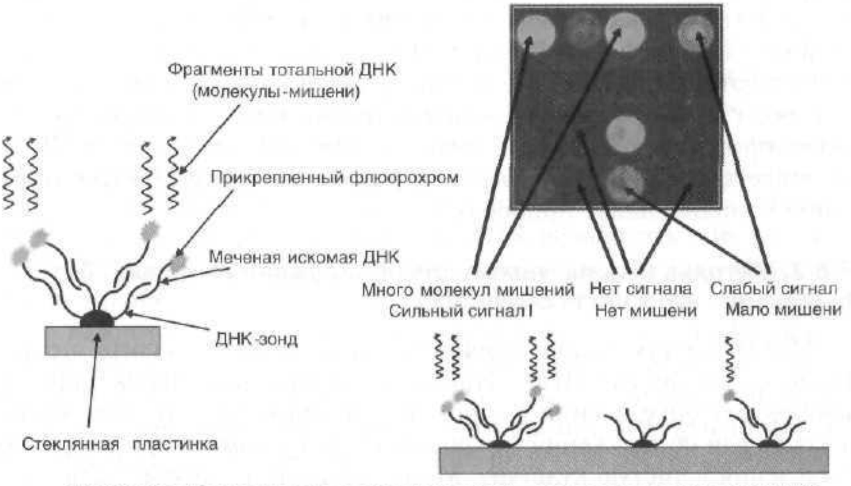



**Рис. 5.6.** Принцип обнаружения специфической последовательности ДНК при помощи микрочипа

Из исследуемого образца выделяют общую ДНК, которую можно амплифицировать по стабильной последовательности 16S РНК-гену. Выделенную ДНК метят флуорохромом или ферментом и обрабатывают ею микрочип, создавая условия для гибридизации. Отмывают несвязавшуюся ДНК, определяют локализацию молекулярных гибридов постановкой ИФА или денситометрией.

Полимеразная цепная реакция позволяет обнаружить микроб в исследуемом материале (воде, продуктах, материале от больного) по наличию в нем ДНК микроба без выделения последнего в чистую культуру.

Для проведения этой реакции из исследуемого материала выделяют ДНК, в которой определяют наличие специфичного для данного микроба гена. Обнаружение гена осуществляют его накоплением. Для этого необходимо иметь праймеры (затравки) комплиментарного 3'-концам ДНК исходного гена. Накопление (амплификация) гена выполняют следующим образом. Выделенную из исследуемого материала ДНК нагревают. При этом ДНК распадается на 2 нити. Добавляют праймеры. Смесь ДНК и праймеров охлаждают. При этом праймеры при наличии в смеси ДНК искомого гена связываются с его комплементарными участками. Затем к смеси ДНК и праймера добавляют ДНК-полимеразу и нуклеотиды. Устанавливают температуру, оптимальную для функционирования ДНК-полимеразы. В этих условиях в случае комплементарности ДНК гена и праймера происходит присоединение нуклеотидов к 3'-концам праймеров, в результате чего синтезируются две копии гена. После этого цикл повторяется снова, при этом количество ДНК гена увеличивается каждый раз вдвое (рис. 5.7). Проводят реакцию в специальных приборах — амплификаторах. Результат оценивают последующей денситометрией амплифицированной ДНК или ее электрофорезом в полиакриламидном геле. ПЦР применяют для диагностики вирусных и бактериальных инфекций.

*ПЦР в реальном времени* представляет ускоренный метод ПЦР, при котором амплификацию и определение продукта амплификации проводят одновременно. Для этой цели в амплификационную пробирку вводят молекулярный зонд, который в случае связывания с амплифицированной цепью генерирует флюоресцентный сигнал определенной длины волны. Реакцию проводят в автоматическом режиме.

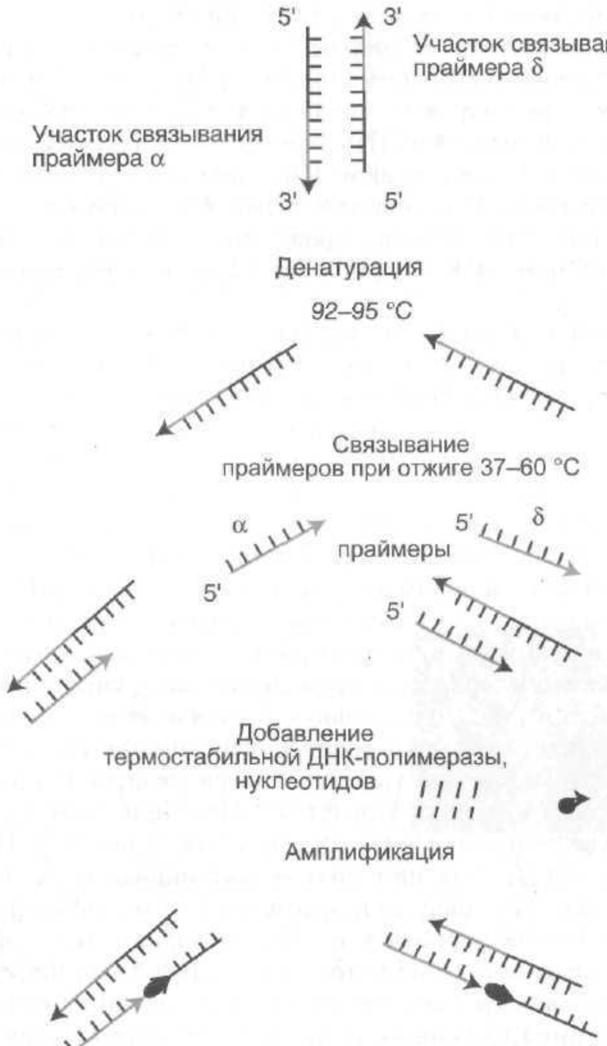



**Рис. 5.7.** Полимеразная цепная реакция (схема)

*Опосредованная транскрипцией амплификация* рРНК используется для диагностики смешанных инфекций. Этот метод основан на обнаружении с помощью молекулярной гибридизации амплифицированных рРНК, специфичных для определенного вида бактерий. Исследование проводят в три этапа:

- амплификация пула рРНК на матрице выделенной из исследуемого материала ДНК при помощи ДНК-зависимой РНК-полимеразы;
- гибридизация накопленного пула рРНК с комплиментарными видоспецифическими рРНК олигонуклеотидами, меченными флюорохромом или ферментами;
- определение продуктов гибридизации методами денситометрии, ИФА.

Реакцию проводят в автоматическом режиме в установках, в которых одномоментное определение рРНК, принадлежащих различным видам бактерий, достигается разделением амплифицированного пула рРНК на несколько проб, в которые вносят для гибридизации комплементарные видоспецифическим рРНК меченые олигонуклеотиды.

# Глава 6

# БИОТЕХНОЛОГИЯ, ГЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

## 6.1. Биотехнология

Биотехнология является наукой, которая на основе изучения процессов жизнедеятельности живых организмов, главным образом микроорганизмов, животных и растительных клеток, использует эти биологические процессы, а также сами биологические объекты для промышленного производства продуктов, необходимых для жизни человека или воспроизводства биоэффектов, не проявляющихся в естественных условиях (А.А. Воробьев).

### 6.1.1. Объекты биотехнологии, ее цели и задачи

Биотехнология (от греч. *bios* — жизнь, *tecen* — искусство, *logos* — наука) представляет собой область знаний, которая возникла и оформилась на стыке микробиологии, молекулярной биологии, генной инженерии, иммунологии, химической технологии и ряда других наук. Рождение биотехнологии обусловлено потребностями общества в новых, более дешевых продуктах для народного хозяйства, в том числе для медицины и ветеринарии, а также принципиально новых технологиях. Целью биотехнологии являются получение продуктов из биологических объектов или с их применением, а также воспроизводство биоэффектов, не встречающихся в природе. В качестве биологических объектов чаще всего используются одноклеточные микроорганизмы, животные и растительные клетки, а также организм животных, человека или растений. Выбор этих объектов обусловлен следующими причинами.

Клетки являются своего рода биофабриками, вырабатывающими в процессе жизнедеятельности разнообразные ценные продукты: белки, жиры, углеводы, витамины, аминокислоты, антибиотики, гормоны, антитела, антигены, ферменты, спирты и т.д. Многие

из этих продуктов, крайне необходимых в жизни человека, пока недоступны для получения небиотехнологическими способами.

Клетки чрезвычайно быстро воспроизводятся. Так, бактериальная клетка делится через каждые 20–60 мин, дрожжевая — через 1,5–2 ч, животная — через 24 ч, что позволяет за относительно короткое время искусственно нарастить на сравнительно дешевых и недефицитных питательных средах в промышленных масштабах *огромные количества биомассы микробных, животных или растительных клеток.*

Биосинтез сложных веществ, таких, как белки, антибиотики, антигены, антитела, значительно экономичнее и технологически доступнее, чем другие виды химического синтеза. При этом исходное сырье для биосинтеза, как правило, проще, дешевле и доступнее, чем сырье для других видов синтеза. Для этого используются отходы сельскохозяйственной, рыбной продукции, пищевой промышленности, растительное сырье, например рыбная мука, меласса, дрожжи, древесина и др.

Биотехнология использует следующие продукты одноклеточных:

- сами клетки как источник целевого продукта;
- крупные молекулы, которые синтезируются клетками в процессе выращивания, — ферменты, токсины, антигены, антитела, пептидогликаны и др.;
- первичные метаболиты — низкомолекулярные вещества (мол. масса менее 1500 Д), необходимые для роста клеток — аминокислоты, витамины, нуклеотиды, органические кислоты и др.;
- вторичные метаболиты (идиолиты) — низкомолекулярные и макромолекулярные соединения, не требующиеся для роста клеток, — антибиотики, алкалоиды, токсины, гормоны и др.

Биотехнология использует эту продукцию клеток как сырье, которое в результате технологической обработки превращается в конечный, пригодный для использования продукт.

Помимо микроорганизмов, животных и растительных клеток, биотехнология в качестве биологических объектов использует органы и ткани человека и животных, растения, организм животных и человека. Например, для получения инсулина используется поджелудочная железа крупного рогатого скота и свиней, гормона роста — гипофизы трупов человека, иммуноглобулинов — организм лошадей и других животных, препаратов крови — кровь доноров и т.д.

Биотехнология, используя перечисленные выше биологические объекты, получает огромный ассортимент продукции, применяемой в медицине, ветеринарии, сельском хозяйстве, пищевой и химической промышленности, других отраслях народного хозяйства. К ним относятся продукты, без которых немыслимо существование современного человека: антибиотики, витамины, ферменты, вакцины, гормоны, аминокислоты, нуклеотиды, комплемент и препараты крови, иммуномодуляторы, антитела, диагностические препараты, сердечно-сосудистые, противоопухолевые и множество других фармацевтических препаратов, пищевые и кормовые белки, биологические средства защиты растений, инсектициды, сахара, спирты, липиды, дрожжи, кислоты, бутанол, ацетон и др.

Помимо этого биотехнология играет большую роль в оздоровлении окружающей среды: с помощью биотехнологических процессов проводят очистку от загрязняющих веществ почвы, водоемов, воздушной среды путем их биоконверсии и биодеградации.

Однако биотехнология не ограничивается получением только вышеперечисленных продуктов. Значительные, более масштабные и революционные проблемы она решает на пути создания трансгенных животных и растений, т.е. создания новых, ранее неизвестных пород животных и растений, а также клонирования животных. Новейший раздел биотехнологии — генная и белковая инженерия — позволяет получать совершенно уникальные биотехнологические эффекты, открывать способы диагностики, профилактики и лечения врожденных болезней, влиять на свойства генома человека, животных и растений.

### 6.1.2. История развития биотехнологии

Старая биотехнология возникла в древности, примерно 6000–5000 лет до н.э., тогда, когда люди научились выпекать хлеб, варить пиво, приготовлять сыр и вино. Этот первый этап биотехнологии был сугубо эмпирический и продолжал оставаться таким, несмотря на совершенствование технологических процессов и расширение сфер использования биотехнологических приемов, вплоть до открытия Л. Пастером в XIX в. ферментативной природы брожения. С этого момента начался второй, научный, этап традиционной биотехнологии. В этот период получены и выделены

ферменты, открыты многие микроорганизмы, разработаны способы их выращивания и получения в массовых количествах, получены культуры животных и растительных клеток и разработаны способы искусственного культивирования, в результате изучения физиологии, биохимии и генетики микробных и животных клеток намечены пути получения многих продуктов микробного синтеза, необходимых для медицины, сельского хозяйства и промышленности. Вначале сформировалась техническая микробиология, а затем — биотехнология. Однако промышленное производство сводилось в основном к получению на основе природных штаммов биомассы бактерий, дрожжей, грибов, вирусов, из которых затем получали или выделяли необходимый продукт (ферменты, антибиотики, антигены, белок и т.д.).

На смену старой, традиционной биотехнологии пришла новая биотехнология, основанная на применении искусственно получаемых штаммов-суперпродуцентов бактерий, клеток животных и растений, использовании иммобилизованных ферментов, применении культур животных и растительных клеток, широком использовании генно-инженерных работ для получения клеток-рекомбинантов, моноклональных антител и других биологически активных веществ.

Рождение новой биотехнологии обусловлено рядом принципиальных открытий и достижений в науке: доказательство двунитевой структуры ДНК, расшифровка генетического кода и доказательство его универсальности для человека, животных, растений, бактерий и т.д., искусственный синтез биологически активных веществ, открытие ферментов обмена нуклеиновых кислот, получение рекомбинантных ДНК, а также рекомбинантных вирусов, бактерий, способных синтезировать несвойственные им продукты, искусственный синтез генов и их экспрессия в биологических объектах, получение трансгенных животных и растений, генодиагностика и генотерапия и др.

Вышеупомянутые фундаментальные достижения позволили в течение последнего десятилетия расшифровать, синтезировать и создать рекомбинантные молекулы для целого ряда белковых продуктов (гормонов, антигенов, ферментов, иммунных препаратов) и получать их в несвойственных биологических системах.

### 6.1.3. Микроорганизмы и процессы, применяемые в биотехнологии

На Земле существует около 100 тыс. видов бактерий, не считая многочисленных грибов (250 тыс. видов), вирусов, простейших. Микробы способны синтезировать продукты или осуществлять реакции, полезные для биотехнологии. Однако в практике используют не более 100 видов микроорганизмов, так как остальные мало изучены.

Так, например, дрожжи используют в хлебопечении, пивоварении, виноделии, получении соков, кормового белка, питательных сред для выращивания бактерий и культур животных клеток.

Из бактерий в биотехнологии чаще всего используют род *Acetobacter* — для превращение этанола в уксусную кислоту, углекислый газ и воду; род *Bacillus* — для получения ферментов (*B. subtilis*), средств защиты растений (*B. thuringiensis*); род *Clostridium* — для сбраживания сахаров в ацетон, этанол, бутанол; молочнокислые бактерии (*Lactobacillus* и др.); псевдомонады, например PP. *denitrificans*, — для получения витамина $B_{12}$; *Corynebacterium gentamicum* — для получения аминокислот и др.

Из грибов в биотехнологии для получения разнообразных антибиотиков применяют род *Streptomyces*, *Penicilium chrysogenium*, *Cefalosporum acremonium*, *Streptomyces spp.* и др.

Естественно, широкое применение в получении диагностикумов, вакцин, иммуноглобулинов, пробиотиков, фагов и других микробных препаратов находят патогенные и вакцинные штаммы болезнетворных микробов, а также условно-патогенные микроорганизмы.

Многие микроорганизмы — бактерии, дрожжи, вирусы — используются в качестве реципиентов чужеродного генетического материала с целью получения рекомбинантных штаммов — продуцентов биотехнологической продукции. Так получены рекомбинантные штаммы *E. coli*, продуцирующие интерфероны, инсулин, гормоны роста, разнообразные антигены; штаммы *B. subtilis*, вырабатывающие интерферон; дрожжи, продуцирующие интерлейкины, антигены вируса гепатита В; рекомбинантные вирусы осповакцины, синтезирующие антигены вируса гепатита В, вируса клещевого энцефалита, ВИЧ и др.

## 6.2. Генетическая инженерия и область ее применения в биотехнологии

Генетическая инженерия является сердцевиной биотехнологии. Она по существу сводится к генетической рекомбинации, т.е. обмену генами между двумя хромосомами, которая приводит к возникновению клеток или организмов с двумя и более наследственными детерминантами (генами), по которым родители различались между собой. Метод рекомбинации *in vitro* или генетической инженерии заключается в выделении или синтезе ДНК из отличающихся друг от друга организмов или клеток, получении гибридных молекул ДНК, введении рекомбинантных (гибридных) молекул в живые клетки, создании условий для экспрессии и секреции продуктов, кодируемых генами.

Гены, кодирующие те или иные структуры, или выделяют (клонируют) как таковые (хромосомы, плазмиды), или прицельно выщепляют из этих генетических образований с помощью ферментов рестрикции. Эти ферменты, а их уже известно более тысячи, способны резать ДНК по многим определенным связям, что является важным инструментом генной инженерии.

В последнее время обнаружены ферменты, расщепляющие по определенным связям РНК, наподобие рестриктаз ДНК. Эти ферменты названы рибозимами.

Сравнительно небольшие гены могут быть получены с помощью химического синтеза. Для этого вначале расшифровывают число и последовательность аминокислот в белковой молекуле вещества, а затем по этим данным узнают очередность нуклеотидов в гене, поскольку каждой аминокислоте соответствуют три нуклеотида (кодон). С помощью синтезатора создают химическим путем ген, аналогичный природному гену.

Полученный одним из способов целевой ген с помощью ферментов лигаз сшивают с другим геном, который используется в качестве вектора, для встраивания гибридного гена в клетку. Вектором могут служить плазмиды, бактериофаги, вирусы человека, животных и растений.

Экспрессируемый ген в виде рекомбинатной ДНК (плазмида, фаг, вирусная ДНК) встраивается в бактериальную или животную клетку, которая приобретает новое свойство — продуцировать несвойственное этой клетке вещество, кодируемое экспрессируемым геном.

В качестве реципиентов экспрессируемого гена чаще всего используют *E. coli*, *B. subtilis*, псевдомонады, нетифоидные серовары сальмонелл, дрожжи, вирусы.

Методом генной инженерии созданы сотни препаратов медицинского и ветеринарного назначения, получены рекомбинантные штаммы-суперпродуценты, многие из которых нашли практическое применение. Уже используются в медицине полученные методом генной инженерии вакцины против гепатита В, интерлейкины-1, 2, 3, 6, инсулин, гормоны роста, интерфероны $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, фактор некроза опухолей, пептиды тимуса, миелопептиды, тканевый активатор плазминогена, эритропоэтин, антигены ВИЧ, фактор свертывания крови, моноклональные антитела и многие антигены для диагностических целей.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля) (к главам 5, 6)

**А.** Назовите процесс, в котором принимает участие бактериофаг:
1. Конъюгация.
2. Трансформация.
3. Трансдукция.
4. Репарация.

**Б.** Назовите свойства плазмиды, необходимые для осуществления передачи хромосомы путем конъюгации:
1. Интегративность.
2. Гипермутабельность.
3. Трансмиссивность.
4. Суперспирализованность.

**В.** Назовите структуры, которые участвуют в распространении генов в популяции бактерий:
1. Плазмиды.
2. Интегрон.
3. Транспозон.
4. Репликон.

**Г.** Назовите ферменты, которые применяются в генной инженерии:
1. Рестриктазы.
2. Лигазы.
3. Протеазы.
4. ДНК-полимераза.

Д. При санитарно-бактериологическом контроле продукции молочного завода из образцов сметаны был высеян возбудитель дизентерии *Shigella flexneri*. Сразу же была проведена проверка сотрудников этого завода на бактерионосительство, во время которой от сотрудника К. был выделен возбудитель того же вида и серовара. Назовите метод, который можно использовать для внутривидовой идентификации выделенных культур, позволивший бы подтвердить или опровергнуть тот факт, что сотрудник К. явился источником заражения продукции.

# Глава 7

# АНТИМИКРОБНЫЕ ХИМИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ ПРЕПАРАТЫ

Химиотерапия — это этиотропное лечение инфекционных заболеваний или злокачественных опухолей, которое заключается в избирательном (селективном) подавлении жизнеспособности возбудителей инфекции или опухолевых клеток химиотерапевтическими средствами. Избирательность действия химиотерапевтического препарата заключается в том, что такое лекарственное средство является токсичным для микробов и при этом существенно не затрагивает клетки организма-хозяина.

## 7.1. Антимикробные химиотерапевтические препараты

Антимикробные химиотерапевтические препараты — это лекарственные средства, которые применяют для избирательного подавления роста и размножения микробов, являющихся причиной инфекционного заболевания, а также (редко и осторожно!) для профилактики инфекций. К химиотерапевтическим препаратам предъявляется целый ряд требований: в идеале они должны обладать хорошей терапевтической эффективностью и минимальной токсичностью для человека, не вызывать побочных эффектов, иметь достаточный спектр антимикробной активности, ингибировать многие виды патогенных микроорганизмов. Они должны сохранять стабильность при широких диапазонах pH, что делает возможным их пероральное применение, и при этом иметь высокий процент биодоступности (способность проникновения в кровеносное русло и ткани), иметь оптимальный период полувыведения, не должны вызывать лекарственную устойчивость микроорганизмов к применяемым препаратам. Существующие в настоящее время химиотерапевтические препараты не полностью отвечают этим

требованиям. Современная химиотерапия занимается постоянным усовершенствованием имеющихся препаратов и созданием новых. В настоящее время известны тысячи химических соединений, обладающих антимикробной активностью, но лишь немногие из них пригодны для применения в качестве химиотерапевтических средств. К антимикробным химиотерапевтическим средствам относят следующие:

- антибиотики (способны воздействовать только на клеточные формы микроорганизмов, также известны противоопухолевые антибиотики);
- синтетические антимикробные химиотерапевтические препараты разного химического строения (среди них есть препараты, которые действуют только на клеточные микроорганизмы или только на вирусы).

Антимикробные химиотерапевтические препараты принято подразделять по спектру их активности. Спектр действия определяется тем, на какие именно микробы действует лекарственное средство. Среди химиотерапевтических препаратов, действующих на клеточные формы микроорганизмов, различают антибактериальные, противогрибковые и противопротозойные. Антибактериальные, в свою очередь, принято подразделять на препараты узкого и широкого спектра действия. Узким спектром обладают препараты, действующие в отношении только небольшого количества разновидностей или грамположительных, или грамотрицательных бактерий, широкий спектр имеют препараты, воздействующие на достаточно большое количество видов представителей обеих групп бактерий.

Особую группу составляют **противовирусные** химиопрепараты (см. раздел 7.6). Кроме того, существуют некоторые антимикробные химиотерапевтические лекарственные средства, обладающие также противоопухолевой активностью.

По типу действия на клеточные мишени чувствительных микроорганизмов (морфологические структуры или отдельные звенья метаболизма) различают микробостатические и микробоцидные химиопрепараты.

Микробоцидные антибиотики необратимо связываются и повреждают клеточные мишени, вызывая гибель чувствительных микроорганизмов. Химиопрепараты со статическим действием ингибируют рост и размножение микробных клеток, однако при

удалении антибиотика жизнедеятельность возбудителей восстанавливается. При лечении микробостатическими препаратами защитные силы организма должны сами окончательно справиться с временно ослабленными микроорганизмами. В зависимости от объекта тип действия называют бактерио-, фунги-, протозоостатическим или соответственно бактерио-, фунги- и протозооцидным.

### 7.1.1. Антибиотики

Тот факт, что одни микроорганизмы могут каким-то образом задерживать рост других, был известен давно, однако химическая природа антагонизма между микробами долгое время была неясна.

В 1928–1929 гг. А. Флеминг открыл штамм плесневого гриба пеницилла (*Penicillium notatum*), выделяющего химическое вещество, которое задерживает рост стафилококка. Вещество было названо пенициллином, однако лишь в 1940 г. Х. Флори и Э. Чейн смогли получить стабильный препарат очищенного пенициллина — первый антибиотик, нашедший широкое применение в клинике. В 1945 г. А. Флеминг, Х. Флори и Э. Чейн были удостоены Нобелевской премии. В нашей стране большой вклад в учение об антибиотиках внесли З.В. Ермольева и Г.Ф. Гаузе.

Сам термин «антибиотик» (от греч. *anti*, *bios* — против жизни) был предложен С. Ваксманом в 1942 г. для обозначения природных веществ, продуцируемых микроорганизмами и в низких концентрациях антагонистичных росту других бактерий.

Антибиотики — это химиотерапевтические препараты из химических соединений биологического происхождения (природные), а также их полусинтетические производные и синтетические аналоги, которые в низких концентрациях оказывают избирательное повреждающее или губительное действие на микроорганизмы и опухоли.

**Классификация антибиотиков по химической структуре**

Антибиотики имеют различное химическое строение, и по этому признаку их подразделяют на классы. Многочисленные препараты антибиотиков, принадлежащих к одному классу, имеют сходный механизм и тип действия, им свойственны похожие побочные эффекты. По спектру действия при сохранении характерных для класса закономерностей различные препараты, особенно разных поколений, нередко имеют различия.

Основные классы антибиотиков:

- β-лактамы (пенициллины, цефалоспорины, карбапенемы, монобактамы);
- гликопептиды;
- липопептиды;
- аминогликозиды;
- тетрациклины (и глицилциклины);
- макролиды (и азалиды);
- линкозамиды;
- хлорамфеникол/левомицетин;
- рифамицины;
- полипептиды;
- полиены;
- разные антибиотики (фузидиевая кислота, фузафунжин, стрептограмины и др.).

**Источники получения природных и полусинтетических антибиотиков**

Основными продуцентами природных антибиотиков являются микроорганизмы, которые, находясь в своей естественной среде (в основном в почве), синтезируют антибиотики в качестве средства борьбы за выживание. Клетки растений и животных также могут вырабатывать разнообразные химические вещества с селективным антимикробным действием (например, фитонциды, антимикробные пептиды и др.), однако широкого применения в медицине в качестве продуцентов антибиотиков они не получили.

Таким образом, основными источниками получения природных и полусинтетических антибиотиков стали:

- плесневые грибы — синтезируют природные β-лактамы (грибы рода *Cephalosporium* и *Penicillium*) и фузидиевую кислоту;
- актиномицеты (особенно стрептомицеты) — ветвящиеся бактерии, синтезируют большинство природных антибиотиков (80%);
- типичные бактерии, например бациллы, псевдомонады, продуцируют бацитрацин, полимиксины и другие вещества, обладающие антибактериальными свойствами.

**Способы получения антибиотиков**

Основные способы получения антибиотиков:

- биологический синтез (используют для получения природных антибиотиков). В условиях специализированных производств

культивируют микробы-продуценты, которые выделяют антибиотики в процессе своей жизнедеятельности;

- биосинтез с последующими химическими модификациями (применяют для создания полусинтетических антибиотиков). Сначала путем биосинтеза получают природный антибиотик, а затем его молекулу изменяют путем химических модификаций, например присоединяют определенные радикалы, в результате чего улучшаются антимикробные и фармакологические свойства препарата;
- химический синтез (применяют для получения синтетических аналогов природных антибиотиков). Это вещества, которые имеют такую же структуру, как и природный антибиотик, но их молекулы синтезированы химически.

β-**Лактамы**. Класс антибиотиков, включающих значительное число природных и полусинтетических соединений, характерной чертой которых является наличие β-лактамного кольца, при разрушении которого препараты теряют свою активность; пенициллины имеют в своем составе 5-членные, а цефалоспорины 6-членные соединения. Тип действия — бактерицидный. Антибиотики этого класса подразделяют на **пенициллины, цефалоспорины, карбапенемы и монобактамы**.

**Пенициллины**. Выделяют природные (получены из грибов) и полусинтетические пенициллины. Природный препарат — *бензилпенициллин* (пенициллин G) и его соли (калиевая и натриевая) — активен против грамположительных бактерий, однако имеет много недостатков: быстро выводится из организма, разрушается в кислой среде желудка, инактивируется пенициллиназами — бактериальными ферментами, разрушающими β-лактамное кольцо. Полусинтетические пенициллины, полученные путем присоединения к основе природного пенициллина — 6-аминопенициллановой кислоте — различных радикалов, имеют преимущества перед природным препаратом, в том числе широкий спектр действия.

- **Депо-препарат** (бициллин), действует около 4 нед (создает депо в мышцах), применяется для лечения сифилиса, профилактики рецидивов ревматизма и других стрептококковых инфекций, пневмококковых пневмоний. Используется для лечения менингококковых инфекций, гонореи.
- **Кислотоустойчивые** (феноксиметилпенициллин), для перорального приема.

- **Пенициллиназоустойчивые** (метициллин, оксациллин), в отличие от природного пенициллина антибиотики этой группы устойчивы к действию пенициллиназы. Эффективны в отношении пенициллинрезистентных стафилококков, а также в отношении *S. pyogenes*. Используются для лечения стафилококковых инфекций, включая абсцессы, пневмонии, эндокардиты и септицемии.
- **Широкого спектра** (ампициллин, амоксициллин). Активность подобна бензилпенициллину, но активны в отношении грамотрицательных аэробных бактерий: кишечных палочек, сальмонелл, шигелл, гемофильных палочек.
- **Антисинегнойные** (препараты делятся на 2 группы: карбоксипенициллины и уреидопенициллины):
  - карбоксипенициллины (карбенициллин, тикарциллин, пипероциллин). Активны в отношении многих грамположительных и грамотрицательных бактерий: нейссерий, большинства штаммов протея и других энтеробактерий. Особое значение имеет активность в отношении *Pseudomonas aeruginosa*;
  - уреидопенициллины (пиперациллин, азлоциллин). Применяются для лечения инфекций, вызванных Pseudomonas aeruginosa, активность против которой в 4–8 раз выше, чем у карбенициллина; и других грамотрицательных бактерий, включая неспорообразующие анаэробы.
- **Комбинированные** (амоксициллин + клавулановая кислота, ампициллин + сульбактам). В состав этих препаратов включены **ингибиторы** ферментов — β-**лактамаз** (клавулановая кислота, сульбактам и др.), содержащие в своей молекуле β-лактамное кольцо. β-лактамное кольцо, связываясь с β-лактамазами, ингибирует их и таким образом защищает молекулу антибиотика от разрушения. Ингибиторы ферментов действуют на все микроорганизмы, чувствительные к ампициллину, а также на неспорообразующие анаэробы.

**Цефалоспорины**. Один из наиболее обширных классов антибиотиков. Основным структурным компонентом этой группы антибиотиков является цефалоспорин С, структурно подобный пенициллину.

Общие свойства цефалоспоринов: выраженное бактерицидное действие, низкая токсичность, широкий терапевтический диапа-

зон, не действуют на энтерококки, листерии, метициллинрезистентные стафилококки, вызывают перекрестную аллергию с пенициллинами у 10% больных. Спектр действия широкий, но более активны в отношении грамотрицательных бактерий. По последовательности внедрения различают 4 поколения (генерации) препаратов, которые отличаются по спектрам активности, устойчивости к β-лактамазам и некоторым фармакологическим свойствам, поэтому препараты одного поколения **не заменяют** препараты другого поколения, а **дополняют**:

- **1 поколение** (цефамезин, цефазолин, цефалотин и др.) — активны в отношении грамположительных бактерий и энтеробактерий. Неактивны в отношении Pseudomonas aeruginosa. Устойчивы к стафилококковым β-лактамазам, но разрушаются β-лактамазами грамотрицательных бактерий;
- **2 поколение** (цефамандол, цефуроксим, цефаклор и др.) — по действию на грамположительные бактерии равноценны цефалоспоринам 1-го поколения, но более активны в отношении грамотрицательных, более устойчивы к β-лактамазам;
- **3 поколение** (цефотаксим, цефтазидим и др.) — обладают особенно высокой активностью против грамотрицательных бактерий из семейства Enterobacteriaceae, некоторые активны в отношении синегнойной палочки. Менее активны в отношении грамположительных бактерий. Высоко резистентны к действию β-лактамаз;
- **4 поколение** (цефепим, цефпирон и др.) — действуют на некоторые грамположительные бактерии (активность в отношении стафилококков сопоставима с цефалоспоринами 2-го поколения), высокая активность в отношении некоторых грамотрицательных бактерий и синегнойной палочки, резистентны к действию β-лактамаз.

**Монобактамы** (*азтреонам, тазобактам и др.*) — моноциклические β-лактамы, узкого спектра действия. Очень активны только против грамотрицательных бактерий, в том числе синегнойной палочки и грамотрицательных колиформных бактерий. Резистентны к β-лактамазам.

**Карбапенемы** *(имипенем, меропенем и др.)* — из всех β-лактамов имеют самый широкий спектр действия за исключением метициллинрезистентных штаммов *S. aureus* и *Enterococcus faecium*. Резистентны к β-лактамазам. *Карбапенемы* — антибиотики резерва,

назначаются при тяжелых инфекциях, вызванных множественно устойчивыми штаммами микроорганизмов, а также при смешанных инфекциях.

**Гликопептиды** (*ванкомицин и тейкопланин*). Активны только в отношении грамположительных бактерий, включая метициллинрезистентные стафилококки. Не действуют на грамотрицательные бактерии вследствие того, что гликопептиды представляют собой очень крупные молекулы, которые не могут проникнуть через поры грамотрицательных бактерий. Токсичны (ототоксичен, нефротоксичен, вызывает флебиты).

Используют при лечении тяжелых инфекций, вызванных стафилококками, устойчивыми к другим антибиотикам, особенно метициллинрезистентными стафилококками, при аллергии к β-лактамам, при псевдомембранозном колите, вызванном *Clostridium difficile*.

**Липопептиды** *(даптомицин)* — новая группа антибиотиков, полученных из стрептомицетов, проявляют бактерицидную активность, в связи с высокой частотой побочных эффектов, одобрены только для лечения осложненных инфекций кожи и мягких тканей. Имеют высокую активность в отношении грамположительных бактерий, включая полирезистентные стафилококки и энтерококки (устойчивые к β-лактамам и гликопептидам).

**Аминогликозиды** — соединения, в состав молекулы которых входят аминосахара. Первый препарат — стрептомицин — был получен в 1943 г. Ваксманом как средство для лечения туберкулеза. Сейчас различают несколько поколений (генераций) препаратов: *(1) стрептомицин, канамицин и др.*; *(2) гентамицин*; *(3) сизомицин, тобрамицин и др.* Аминогликозиды обладают бактерицидной активностью, прежде всего в отношении грамотрицательных аэробных микроорганизмов, включая *Pseudomonas aruginosa*, а также стафилококков, действуют на некоторых простейших. Не действуют на стрептококки и облигатно-анаэробные микроорганизмы. Используются для лечения тяжелых инфекций, вызванных энтеробактериями и другими грамотрицательными аэробными микроорганизмами. Нефро- и ототоксичны.

**Тетрациклины** — это семейство крупномолекулярных препаратов, имеющих в своем составе четыре цикличных соединения. Тип действия — статический. Обладают широким спектром активности в отношении многих грамположительных и грамотрицатель-

ных бактерий, внутриклеточных паразитов. Назначаются прежде всего для лечения инфекций, вызванных внутриклеточно расположенными микробами: риккетсиями, хламидиями, микоплазмами, бруцеллами, легионеллами. В настоящее время применяют полусинтетические препараты, например *доксициклин*.

Новой генерацией тетрациклинов являются полусинтетические аналоги тетрациклина — ***глицилциклины***, к которым относится препарат *тигециклин*. Глицилциклины обладают более прочной связью с рибосомами. *Тигециклин* активен против широкого спектра грамположительных и грамотрицательных бактерий, включая мультирезистентные, неферментирующие грамотрицательные бактерии, такие, как *Acinetobacter spp.*, метициллинрезистентные штаммы стафилококков, резистентные к ванкомицину, энтерококки и резистентные к пенициллину пневмококки. Препарат способен реагировать с рибосомами бактерий, устойчивыми к действию природных тетрациклинов. Неактивен в отношении *P. aeruginosa*.

Тетрациклины не используются в педиатрической практике, так как накапливаются в растущей зубной ткани («синдром черных зубов»).

**Макролиды** (и азалиды) — это семейство больших макроциклических молекул. *Эритромицин* — наиболее известный и широко используемый антибиотик. Более новые препараты: *азитромицин*, *кларитромицин* (их можно применять всего 1–2 раза в сутки). Тип действия — статический (хотя в зависимости от вида микроба может быть и цидным). Спектр действия — широкий, активны и в отношении внутриклеточных паразитов (хламидий, риккетсий, легионелл и микоплазм). Активность этой группы препаратов направлена прежде всего против грамположительных микроорганизмов, а также гемофильных палочек, бордетелл, нейссерий.

**Линкозамиды** (*линкомицин* и его хлорированный дериват — *клиндамицин*). Спектр активности и механизм действия схож с макролидами, клиндамицин высокоактивен в отношении облигатноанаэробных микроорганизмов. Бактериостатический эффект.

**Стрептограмины**. Природный антибиотик пристиномицин получен из стрептомицет. Комбинация 2 полусинтетических дериватов пристиномицина: хинупристин/дальфопристин, в соотношении 3:7 обладает бактерицидным эффектом в отношении стафилококков и стрептококков, включая штаммы, резистентные к другим антибиотикам.

**Хлорамфеникол/левомицетин**. Статический тип действия, обладает широким спектром антимикробной активности, включая грамположительные и грамотрицательные микроорганизмы, а также внутриклеточные паразиты (хламидии, риккетсии), микоплазмы. Имеет в составе молекулы нитробензеновое «ядро», которое делает препарат токсичным для клеток организма человека. Вызывает обратимый депрессивный эффект костно-мозгового кроветворения. У новорожденных вызывает развитие синдрома «серого ребенка»[1].

**Рифамицины** (рифампицин). Действие — бактерицидное, спектр — широкий (в том числе внутриклеточные паразиты, очень эффективны против микобактерий). Активен в отношении многих стафилококков, стрептококков, легионелл и микобактерий. Неэффективен в отношении энтеробактерий и псевдомонад. В настоящее время используются прежде всего для лечения туберкулеза. При использовании этого препарата биологические жидкости окрашиваются в розовый цвет. Вызывает транзиторные нарушения функции печени.

**Полипептиды** (полимиксины). Спектр антимикробного действия — узкий (грамотрицательные бактерии), тип действия — бактерицидный. Очень токсичны. Применение — наружное, в настоящее время не используются.

**Полиены** (амфотерицин В, нистатин и др.). Противогрибковые препараты, токсичность которых достаточно велика, поэтому применяются чаще местно (нистатин), а при системных микозах — препаратом выбора является амфотерицин В.

### 7.1.2. Синтетические антимикробные химиотерапевтические препараты

Методами химического синтеза целенаправленно создано много антимикробных веществ с избирательным действием, которые не встречаются в живой природе, но похожи на антибиотики по механизму, типу и спектру действия.

Впервые синтетический препарат для лечения сифилиса (сальварсан) синтезировал П. Эрлих в 1908 г. на основе органических

---

[1] Синдром «серого ребенка»: левомицетин метаболизируется в печени, образуя глюкурониды, поэтому при врожденном дефиците фермента глюкуронилтрансферазы препарат накапливается в крови в токсических концентрациях, в результате чего возникают серый цвет кожи, увеличение печени, боли в сердце, отеки, рвота, общая слабость.

соединений мышьяка. В 1935 г. Г. Домагк предложил пронтозил (красный стрептоцид) для лечения бактериальных инфекций. Действующим началом пронтозила являлся сульфаниламид, который высвобождался при разложении пронтозила в организме.

С тех пор создано много разновидностей антибактериальных, противогрибковых, противопротозойных синтетических химиотерапевтических лекарственных средств разного химического строения. В настоящее время для конструирования новых синтетических антимикробных лекарственных средств ведется постоянный целенаправленный поиск у микробов таких белков, которые могли бы стать новыми мишенями, обеспечивающими принцип избирательности действия этих препаратов.

К наиболее значимым группам широко применяемых синтетических препаратов, активных против клеточных форм микроорганизмов, относятся сульфаниламиды, нитроимидазолы, хинолоны/фторхинолоны, оксазолидиноны, нитрофураны, имидазолы и многие другие (противотуберкулезные, противосифилитические, противомалярийные и т.п.).

Особую группу составляют синтетические **противовирусные** препараты (см. раздел 7.6).

**Сульфаниламиды**. Бактериостатики, обладают широким спектром активности, включая стрептококки, нейссерии, гемофильные палочки. Основу молекулы этих препаратов составляет парааминогруппа, поэтому они действуют как аналоги и конкурентные антагонисты парааминобензойной кислоты (ПАБК), которая необходима бактериям для синтеза фолиевой (тетрагидрофолиевой) кислоты — предшественника пуриновых и пиримидиновых оснований. Роль сульфаниламидов в лечении инфекций в последнее время снизилась, так как существует много устойчивых штаммов, серьезны побочные эффекты и активность сульфаниламидов в целом ниже, чем у антибиотиков. Единственным препаратом этой группы, который продолжает достаточно широко использоваться в клинической практике, является ко-тримоксазол и его аналоги. *Ко-тримоксазол (бактрим, бисептол)* — комбинированный препарат, который состоит из сульфаметоксазола и триметоприма. Триметоприм блокирует синтез фолиевой кислоты, но на уровне другого фермента. Оба компонента действуют синергически, потенцируя действие друг друга. Действует бактерицидно. Применяют при инфекциях мочевого тракта, вызванных грамотрицательными бактериями.

**Хинолоны/фторхинолоны** (налидиксовая кислота, ципрофлоксацин, офлоксацин, левофлоксацин, моксифлоксацин, норфлоксацин и др.) — фторированные производные 4-хинолон-3 карбоновой кислоты. У фторхинолонов спектр — широкий, тип действия — цидный. Фторхинолоны высокоактивны в отношении грамотрицательного спектра микроорганизмов, включая энтеробактерии, псевдомонады, хламидии, риккетсии, микоплазмы. Неактивны в отношении стрептококков и анаэробов.

Новые поколения фторхинолонов (моксифлоксацин, левофлоксацин) обладают активностью в отношении пневмококков. Их применяют также при инфекциях, вызванных грамотрицательными бактериями (в том числе синегнойной палочкой), внутриклеточными паразитами, микобактериями. Негативно влияют на растущую хрящевую ткань, поэтому ограничено их использование в педиатрической практике.

**Нитроимидазолы** (метронидазол, или трихопол). Тип действия — цидный, спектр — анаэробные бактерии и простейшие (трихомонады, лямблии, дизентерийная амеба). Метронидазол способен активироваться бактериальными нитроредуктазами. Активные формы этого препарата способны расщеплять ДНК. Особенно активны против анаэробных бактерий, так как они способны активировать метронидазол.

**Имидазолы** (*клотримазол* и др.) — противогрибковые препараты, действуют на уровне эргостеролов цитоплазматической мембраны.

**Нитрофураны** (*фуразолидон* и др.). Тип действия — цидный, спектр действия — широкий. Накапливаются в моче в высоких концентрациях. Применяются как уросептики для лечения инфекций мочевыводящих путей.

**Оксазолидиноны** (*линезолид*). Тип действия в отношении стафилококков статический, в отношении некоторых других бактерий (в том числе грамотрицательных) — цидный, спектр действия — широкий. Обладает активностью против широкого спектра грамположительных бактерий, включая метициллинрезистентные стафилококки, пенициллинрезистентные пневмококки и ванкомицинрезистентные энтерококки. При длительном применении может приводить к угнетению функций кроветворения (тромбоцитопения).

## 7.2. Механизмы действия антимикробных химиотерапевтических препаратов, активных в отношении клеточных форм микроорганизмов

*Основа осуществления избирательного действия антимикробных* химиотерапевтических препаратов состоит в том, что мишени для их воздействия в микробных клетках отличаются от таковых в клетках макроорганизма. Большинство химиопрепаратов вмешиваются в метаболизм микробной клетки, поэтому особенно активно влияют на микроорганизмы в фазе их активного роста и размножения.

По механизму действия различают следующие группы антимикробных химиопрепаратов: ингибиторы синтеза и функций клеточной стенки бактерий, ингибиторы синтеза белка у бактерий, ингибиторы синтеза и функций нуклеиновых кислот, нарушающие синтез и функции ЦПМ (табл. 7.1).

**Таблица 7.1.** Классификация антимикробных химиотерапевтических препаратов по механизму действия

| **Ингибиторы *синтеза и функций* клеточной стенки бактерий** | **Ингибиторы *синтеза белка* на рибосомах бактерий** | **Ингибиторы синтеза и функций нуклеиновых кислот** | **Ингибиторы синтеза и функций ЦПМ** |
|---|---|---|---|
| • β-Лактамы (пенициллины, цефалоспорины, карбапенемы, монобактамы)<br>• Гликопептиды<br>• Липопептиды | • Аминогликозиды<br>• Тетрациклины<br>• Хлорамфеникол<br>• Линкозамиды<br>• Макролиды<br>• Оксазолидиноны<br>• Стрептограмины | Ингибиторы синтеза РНК<br>• Рифамицины<br>Ингибиторы синтеза предшественников нуклеиновых кислот<br>• Сульфаниламиды<br>Ингибиторы синтеза ДНК<br>• Хинолоны<br>• Нитроимидазолы<br>• Нитрофураны | • Полимиксины<br>• Полиены<br>• Имидазолы |

### 7.2.1. Ингибиторы синтеза и функций клеточной стенки бактерий

Важнейшими группами антимикробных препаратов, избирательно действующих на синтез клеточной стенки бактерий, являются β-лактамы, гликопептиды и липопептиды.

Пептидогликан — основа клеточной стенки бактерий. Синтез предшественников пептидогликана начинается в цитоплазме. Затем они транспортируются через ЦПМ, где происходит их объединение в гликопептидные цепи (эту стадию ингибируют **гликопептиды** путем связывания с D-аланином). Образование полноценного пептидогликана происходит на внешней поверхности ЦПМ. Этот этап включает в себя процесс образования поперечных сшивок гетерополимерных цепей пептидогликана и совершается при участии белков-ферментов (транспептидаз), которые называют пенициллинсвязывающими белками (ПСБ), так как именно они служат мишенью для пенициллина и других β-лактамных антибиотиков. Ингибирование ПСБ приводит к накоплению в бактериальной клетке предшественников пептидогликана и запуску системы аутолиза. В результате действия аутолитических ферментов и увеличения осмотического давления цитоплазмы происходит лизис бактериальной клетки.

Действие **липопептидов** направлено не на синтез пептидогликана, а на формирование канала в клеточной стенке при необратимом соединении гидрофобной части молекулы липопептида с клеточной мембраной грамположительных бактерий. Образование такого канала приводит к быстрой деполяризации клеточной мембраны из-за выхода калия и, возможно, других ионов, содержащихся в цитоплазме, в результате чего также наступает гибель бактериальной клетки.

### 7.2.2. Ингибиторы синтеза белка у бактерий

Мишенью для этих препаратов являются белоксинтезирующие системы прокариот, которые имеют отличия от рибосом эукариот, что обеспечивает селективность действия этих препаратов. Синтез белка — многоступенчатый процесс, где задействовано множество ферментов и структурных субъединиц. Известны несколько точек-мишеней, на которые способны воздействовать препараты этой группы в процессе биосинтеза белка.

**Аминогликозиды, тетрациклины** и **оксазолидиноны** связываются с 30S-субъединицей, блокируя процесс еще до начала синтеза белка. **Аминогликозиды** необратимо связываются с 30S-субъединицей рибосом и нарушают присоединение к рибосоме тРНК, происходит образование дефектных инициальных комплексов. **Тетрациклины** обратимо связываются с 30S-субъединицей рибосом и препятствуют присоединению нового аминоацила тРНК к акцепторному сайту и перемещению тРНК с акцепторного на донорский сайт. **Оксазолидиноны** блокируют связывание двух субъединиц рибосом в единый 70S-комплекс, нарушают терминацию и высвобождение пептидной цепи.

**Макролиды, хлорамфеникол, линкозамиды и стрептограмины** соединяются с 50S-субъединицей и ингибируют процесс элонгации полипептидных цепей при синтезе белка. **Хлорамфеникол** и **линкозамиды** нарушают формирование пептида, катализируемого пептидилтрансферазой, макролиды ингибируют транслокацию пептидил тРНК. Однако эффект этих препаратов бактериостатичен. **Стрепторамины, хинупристин/дальфопристин** ингибируют синтез белка в синергичной манере, оказывая бактерицидное действие. **Хинупристин** связывает 50S-субъединицу и предупреждает элонгацию полипептида. **Дальфопристин** присоединяется рядом, изменяет конформацию 50S-рибосомальной субъединицы, увеличивая тем самым прочность связывания с ней хинупристина.

### 7.2.3. Ингибиторы синтеза и функций нуклеиновых кислот

Несколько классов антимикробных препаратов способны нарушать синтез и функцию бактериальных нуклеиновых кислот, что достигается тремя способами: ингибированием синтеза предшественников пуринпиримидиновых оснований (сульфаниламиды, триметоприм), подавлением репликации и функций ДНК (хинолоны/фторхинолоны, нитроимидазолы, нитрофураны) и ингибированием РНК-полимеразы (рифамицины). В большинстве своем в эту группу входят синтетические препараты, из антибиотиков подобным механизмом действия обладают только **рифамицины**, которые присоединяются к РНК-полимеразе и блокируют синтез мРНК.

Действие **фторхинолонов** связано с ингибицией синтеза бактериальной ДНК путем блокирования фермента ДНК-гиразы. ДНК-гираза является топоизомеразой II, которая обеспечивает расплетание молекулы ДНК, необходимое для ее репликации.

**Сульфаниламиды** — структурные аналоги ПАБК — могут конкурентно связываться и ингибировать фермент, который нужен для перевода ПАБК в фолиевую кислоту — предшественник пуриновых и пиримидиновых оснований. Эти основания необходимы для синтеза нуклеиновых кислот.

### 7.2.4. Ингибиторы синтеза и функций ЦПМ

Число антибиотиков, специфически действующих на мембраны бактерий, невелико. Наиболее известны полимиксины (полипептиды), к которым чувствительны только грамотрицательные бактерии. **Полимиксины** лизируют клетки, повреждая фосфолипиды клеточных мембран. Из-за токсичности их применяют лишь для лечения местных процессов и не вводят парентерально. В настоящее время на практике не используют.

Противогрибковые препараты (антимикотики) повреждают эргостеролы ЦПМ грибов (полиеновые антибиотики) и ингибируют один из ключевых ферментов биосинтеза эргостеролов (имидазолы).

### 7.2.5. Побочное воздействие на микроорганизмы

Применение антимикробных химиопрепаратов не только оказывает на микробы прямое угнетающее или губительное воздействие, но и может привести к формированию атипичных форм микробов (например, к образованию L-форм бактерий) и персистирующих форм микробов. Широкое использование антимикробных лекарственных средств приводит также к формированию антибиотикозависимости (редко) и лекарственной устойчивости — антибиотикорезистентности (достаточно часто).

## 7.3. Лекарственная устойчивость бактерий

В последние годы значительно увеличилась частота выделения микробных штаммов, устойчивых к действию антибиотиков.

Антибиотикорезистентность — это устойчивость микробов к антимикробным химиопрепаратам. Бактерии следует считать резистентными, если они не обезвреживаются такими концентрациями препарата, которые реально создаются в макроорганизме. Резистентность к антибиотикам может быть природной и приобретенной.

### 7.3.1. Природная устойчивость

Природная устойчивость — врожденный видовой признак микроорганизма. Она связана с отсутствием мишени для конкретного антибиотика или ее недоступностью. В этом случае использование данного антибиотика с лечебной целью нецелесообразно. Некоторые виды микробов исходно устойчивы к определенным семействам антибиотиков или в результате отсутствия соответствующей мишени, например микоплазмы не имеют клеточной стенки, поэтому нечувствительны ко всем препаратам, действующим на этом уровне, или в результате бактериальной непроницаемости для данного препарата, например грамотрицательные микробы менее проницаемы для крупномолекулярных соединений, чем грамположительные бактерии, так как их наружная мембрана имеет узкие поры.

### 7.3.2. Приобретенная устойчивость

Приобретенная устойчивость характеризуется способностью отдельных штаммов микроорганизмов выжизать при концентрациях антибиотиков, способных ингибировать основную часть микробной популяции данного вида. При дальнейшем распространении антибиотикорезистентных штаммов они могут стать преобладающими.

Начиная с 40-х годов XX века, когда антибиотики стали внедряться в медицинскую практику, бактерии стали чрезвычайно быстро приспосабливаться, постепенно формируя устойчивость ко всем новым препаратам. Приобретение резистентности — это биологическая закономерность, связанная с адаптацией микроорганизмов к условиям внешней среды. К химиопрепаратам могут адаптироваться не только бактерии, но и остальные микробы — от эукариотических форм (простейшие, грибы) до вирусов. Проблема формирования и распространения лекарственной резистентности микробов особенно значима для внутрибольничных инфекций, вызываемых так называемыми госпитальными штаммами, у которых, как правило, наблюдается множественная устойчивость к разным группам антимикробных химиотерапевтических препаратов (так называемая полирезистентность).

### 7.3.3. Генетические основы приобретенной резистентности

Устойчивость к антимикробным препаратам определяется и поддерживается генами, обусловливающими резистентность, и

условиями, способствующими их распространению в микробных популяциях. Эти гены могут быть локализованы как в бактериальной хромосоме, так и в плазмидах, а также могут входить в состав профагов и мобильных генетических элементов (транспозонов). Транспозоны осуществляют перенос генов, обусловливающих резистентность с хромосомы на плазмиды и обратно, а также перенос между плазмидами и бактериофагами.

Возникновение и распространение приобретенной устойчивости к антимикробным препаратам обеспечивается генотипической изменчивостью, связанной в первую очередь с мутациями. Мутации происходят в геноме микробов независимо от применения антибиотика, т.е. сам препарат не влияет на частоту мутаций и не является их причиной, но служит фактором отбора, поскольку в присутствии антибиотика происходит селекция устойчивых особей, тогда как чувствительные погибают. Далее резистентные клетки дают потомство и могут передаваться в организм следующего хозяина (человека или животного), формируя и распространяя резистентные штаммы. Предполагается также существование так называемой коселекции, т.е. селективного давления не только антибиотиков, но и других факторов.

Таким образом, приобретенная лекарственная устойчивость может возникать и распространяться в популяции бактерий в результате:

- мутаций в геноме бактериальной клетки с последующей селекцией (т.е. отбором) мутантов, особенно активно такая селекция идет в присутствии антибиотиков;
- переноса трансмиссивных плазмид резистентности (R-плазмид). При этом некоторые плазмиды могут передаваться между бактериями разных видов, поэтому одни и те же гены резистентности можно встретить у бактерий, таксономически далеких друг от друга (например, одна и та же плазмида может быть у грамотрицательных бактерий, у гонококка, резистентного к пенициллину, и у гемофильной палочки, резистентной к ампициллину);
- переноса транспозонов, несущих гены резистентности. Транспозоны могут мигрировать с хромосомы на плазмиду и обратно, а также с плазмиды на другую плазмиду. Таким образом далее гены резистентности могут передаваться дочерним клеткам или при передаче плазмид другим бактериям-реципиентам;

- экспрессии генных кассет интегронами. Интегроны — это генетические элементы, которые содержат в себе ген интегразы, специфический сайт интеграции и рядом с ним промотор, что придает им способность интегрировать в себя мобильные генные кассеты (например, содержащие гены резистентности) и экспрессировать присутствующие в них беспромоторные гены.

### 7.3.4. Реализация приобретенной устойчивости

Для осуществления своего антимикробного действия препарат должен, оставаясь активным, пройти сквозь оболочки микробной клетки и потом связаться с внутриклеточными мишенями. Однако в результате приобретения микроорганизмом генов резистентности некоторые свойства бактериальной клетки изменяются таким образом, что действие препарата не может быть выполнено.

Наиболее часто устойчивость реализуется следующими способами:

- Происходит изменение структуры мишеней, чувствительных к действию антибиотиков (модификация мишени). Фермент-мишень может быть так изменен, что его функции не нарушаются, но способность связываться с химиопрепаратом (аффинность) резко снижается или может быть включен обходной путь метаболизма, т.е. в клетке активируется другой фермент, который не подвержен действию данного препарата. Например, изменение структуры ПСБ (транспептидазы) приводит к возникновению резистентности к β-лактамам, изменение структуры рибосом — к аминогликозидам и макролидам, изменение структуры ДНК-гираз — к фторхинолонам, РНК-синтетаз — к рифампицину.
- Возникает недоступность мишени за счет снижения проницаемости клеточных мембран или эффлюкс-механизма — системы активного энергозависимого выброса антибиотика из клеточных мембран, что наиболее часто проявляется при воздействии малых доз препарата (например, синтез специфических белков в наружной мембране клеточной стенки бактерий может обеспечить свободный выход тетрациклина из клетки во внешнюю среду).
- Приобретается способность к инактивации препарата бактериальными ферментами (энзиматическая инактивация антибиотиков). Некоторые бактерии способны продуцировать особые

ферменты, обусловливающие возникновение резистентности. Такие ферменты могут разрушать активный центр антибиотика, например β-лактамазы разрушают β-лактамные антибиотики с образованием неактивных соединений. Либо ферменты могут модифицировать антибактериальные препараты путем добавления новых химических групп, что ведет к утрате активности антибиотика — аминогликозидаденилтрансферазы, хлорамфениколацетилтрансферазы и др. (таким образом инактивируются аминогликозиды, макролиды, линкозамиды). Гены, кодирующие эти ферменты, широко распространены среди бактерий, чаще встречаются в составе плазмид, транспозонов и генных кассет.

Для борьбы с инактивирующим действием β-лактамаз используют вещества-ингибиторы (например, клавулановую кислоту, сульбактам, тазобактам).

Предупредить развитие антибиотикорезистентности у бактерий практически невозможно, но необходимо использовать антимикробные препараты таким образом, чтобы снизить селективное действие антибиотиков, способствующее повышению стабильности генома резистентных штаммов и не способствовать развитию и распространению устойчивости.

Сдерживанию распространения антибиотикорезистентности способствует выполнение ряда рекомендаций.

Следует до назначения препарата установить возбудитель инфекции и определить его чувствительность к антимикробным химиотерапевтическим препаратам (антибиотикограмма). С учетом результатов антибиотикограммы больному назначают препарат узкого спектра, обладающий наибольшей активностью в отношении конкретного возбудителя, в дозе, в 2—3 раза превышающей минимальную ингибирующую концентрацию. Поскольку начинать лечение инфекции нужно как можно раньше, то пока возбудитель неизвестен, *обычно назначают препараты более широкого спектра*, активные в отношении всех возможных микробов, наиболее часто вызывающих данную патологию. Коррекцию лечения проводят с учетом результатов бактериологического исследования и определения индивидуальной чувствительности конкретного возбудителя (обычно через 2—3 дня). Дозы препаратов должны быть достаточными, для того чтобы обеспечить в биологических жидкостях и тканях микробостатические или микробоцидные концентрации.

Необходимо представлять оптимальную продолжительность лечения, так как клиническое улучшение не является основанием для отмены препарата, потому что в организме могут сохраняться возбудители и может быть рецидив болезни. Следует минимально *использовать антибиотики с целью профилактики инфекционных* заболеваний; в процессе лечения через 10–15 дней антибиотикотерапии менять антимикробные препараты, особенно в пределах одного стационара; при тяжелых, угрожающих жизни инфекциях проводить лечение одновременно 2–3 сочетающимися антибиотиками с различным молекулярным механизмом действия; применять антибиотики, комбинированные с ингибиторами β-лактамаз; уделять особое внимание рациональному применению антибиотиков в таких областях, как косметология, стоматология, ветеринария, животноводство и т.п.; не использовать в ветеринарии антибиотики, применяемые для лечения людей.

Однако в последнее время даже эти меры становятся менее эффективными в связи с разнообразием генетических механизмов формирования резистентности.

Весьма важным условием для правильного выбора антимикробного препарата при лечении конкретного пациента являются результаты специальных тестов для определения чувствительности возбудителя инфекции к антибиотикам.

## 7.4. Определение чувствительности бактерий к антибиотикам

Для определения чувствительности бактерий к антибиотикам (антибиотикограмма) обычно применяют:

- методы диффузии в агар. На агаризованную питательную среду засевают исследуемую чистую культуру микроба, а затем вносят антибиотики. Обычно препараты вносят или в специальные лунки в агаре (количественный метод), или на поверхности посева раскладывают диски с антибиотиками (метод дисков — качественный метод). Результаты учитывают через сутки по наличию или отсутствию роста микробов вокруг лунок (дисков);
- методы определения минимальных ингибирующих (МИК) и бактерицидных (МБК) концентраций, т.е. минимальный уровень антибиотика, который позволяет *in vitro* предотвратить видимый рост микробов в питательной среде или полностью ее стерилизует. Это количественные методы, которые позво-

ляют рассчитать дозу препарата, так как при лечении концентрация антибиотика в крови должна быть значительно выше МИК *для возбудителя инфекции. Введение адекватных доз* препарата необходимо для эффективного лечения и профилактики формирования устойчивых микробов. Существуют ускоренные способы с применением автоматических анализаторов.

Молекулярно-генетические методы (ПЦР и др.) позволяют исследовать геном микробов и обнаружить в нем гены резистентности.

## 7.5. Осложнения антимикробной химиотерапии со стороны макроорганизма

Как всякие лекарственные средства, практически каждая группа антимикробных химиопрепаратов может оказывать побочное действие на макроорганизм и другие лекарственные средства, применяемые у конкретного пациента.

К наиболее частым осложнениям антимикробной химиотерапии относятся:

- дисбиоз (дисбактериоз). Формирование дисбиоза приводит к нарушению функций желудочно-кишечного тракта, развитию авитаминоза, присоединению вторичной инфекции (кандидоз, псевдомембранозный колит, вызванный *C. difficile и др.*). Предупреждение этих осложнений состоит в назначении по возможности препаратов узкого спектра действия, сочетании лечения основного заболевания с противогрибковой терапией (нистатин), витаминотерапией, применением эубиотиков (пре-, про- и синбиотиков) и т.п.;
- отрицательное воздействие на иммунную систему. Наиболее часто развиваются аллергические реакции. Гиперчувствительность может возникнуть как к самому препарату, так и к продуктам его распада, а также комплексу препарата с сывороточными белками. Аллергические реакции развиваются примерно в 10% случаев и проявляются в виде сыпи, зуда, крапивницы, отека Квинке. Относительно редко встречается такая тяжелая форма гиперчувствительности, как анафилактический шок. Это осложнение могут вызывать β-лактамы (пенициллины), рифамицины и др. Сульфаниламиды могут вызвать гиперчувствительность замедленного типа. Предупреждение осложне-

ний состоит в тщательном сборе аллергологического анамнеза и назначении препаратов в соответствии с индивидуальной чувствительностью пациента. Известно также, что антибиотики обладают некоторым иммунодепрессивным свойством и могут способствовать развитию вторичного иммунодефицита и ослаблению напряженности иммунитета.

Токсическое действие препаратов чаще проявляется при длительном и систематическом применении антимикробных химиотерапевтических препаратов, когда создаются условия для их накопления в организме. Особенно часто такие осложнения бывают, когда мишенью действия препарата являются процессы или структуры, близкие по составу или строению к аналогичным структурам клеток макроорганизма. Токсическому действию антимикробных препаратов особенно подвержены дети, беременные, пациенты с нарушением функций печени, почек. Побочное токсическое влияние может проявляться как нейротоксическое (гликопептиды и аминогликозиды оказывают ототоксическое действие вплоть до полной потери слуха за счет воздействия на слуховой нерв); нефротоксическое (полиены, полипептиды, аминогликозиды, макролиды, гликопептиды, сульфаниламиды); общетоксическое (противогрибковые препараты — полиены, имидазолы); угнетение кроветворения (тетрациклины, сульфаниламиды, левомицетин/хлорамфеникол, который содержит нитробензен — супрессор функции костного мозга); тератогенное (аминогликозиды, тетрациклины нарушают развитие костей, хрящей у плода и детей, формирование зубной эмали — коричневая окраска зубов, левомицетин/хлорамфеникол токсичен для новорожденнных, у которых ферменты печени не полностью сформированы (синдром «серого ребенка»), хинолоны — действуют на развивающуюся хрящевую и соединительную ткани).

Предупреждение осложнений состоит в отказе от противопоказанных данному пациенту препаратов, контроль за состоянием функций печени, почек и т.п.

Эндотоксический шок (терапевтический) возникает при лечении инфекций, вызванных грамотрицательными бактериями. Введение антибиотиков вызывает гибель и разрушение клеток и высвобождение больших количеств эндотоксина. Это закономерное явление, которое сопровождается временным ухудшением клинического состояния больного.

Взаимодействие с другими препаратами. Антибиотики могут способствовать потенцированию действия или инактивации других препаратов (например, эритромицин стимулирует выработку ферментов печени, которые начинают ускоренно метаболизировать лекарственные средства разного назначения).

## 7.6. Противовирусные химиотерапевтические препараты

Противовирусные химиопрепараты — это этиотропные препараты, способные оказывать воздействие на отдельные звенья репродукции тех или иных вирусов, нарушая их репродукцию в инфицированных клетках. Некоторые препараты обладают вирулоцидным свойством.

В качестве противовирусных химиопрепаратов используются аналоги нуклеозидов, синтетические пептиды, аналоги пирофосфата, тиосемикабазонов, синтетические амины.

По механизму действия противовирусные химиопрепараты подразделяются на препараты, нарушающие процессы проникновения вируса в клетку и его депротеинезацию, ингибиторы синтеза вирусных нуклеиновых кислот, ингибиторы вирусных ферментов.

К *препаратам, ингибирующим процесс проникновения вируса в клетку и его депротеинизацию*, относятся:

- синтетические амины (амантанин), который специфически ингибирует вирусы гриппа типа А, нарушая процесс «раздевания» вируса, взаимодействуя с матриксным белком;
- искусственно синтезированные пептиды, в частности пептид из 36 аминокислот (энфувиртид), ингибирующий процесс слияния мембраны клетки и ВИЧ-1, путем изменения конформации трансмембранного белка gp41 (см. раздел 17.1.11).

*Препараты, ингибирующие процесс репликации вирусных нуклеиновых кислот.* Ингибиторы синтеза вирусных нуклеиновых кислот в большинстве случаев являются аналогами нуклеозидов. Некоторые из них (йодоксиуридин) могут действовать как антиметаболиты, встраиваясь в вирусную нуклеиновую кислоту в процессе ее репликации и таким образом обрывая дальнейшую элонгацию цепи. Другие препараты действуют как ингибиторы вирусных полимераз.

Ингибиторы вирусных полимераз активны в фосфорилированной форме. Так как ингибиторы вирусных полимераз могут так-

же ингибировать и клеточные полимеразы, предпочтение отдается тем препаратам, которые специфически ингибируют вирусные ферменты. К препаратам, избирательно действующим на вирусную полимеразу, относится аналог гуанозина ацикловир. Фосфорилирование ацикловира наиболее эффективно осуществляется не клеточной киназой, а вирусной тимидинкиназой, которая имеется у вирусов простого герпеса I и II типа, в отношении которых активен этот препарат.

Ингибитором вирусных полимераз является также аналог тимидина видарабин.

Ингибировать вирусные полимеразы также могут и ненуклеозидные производные, в частности органический аналог неорганического пирофосфата фоскарнет, который, связывая полифосфатные группы ДНК-полимеразы вируса, блокирует элонгацию молекулы ДНК. Активен в отношении вирусов гепатита В, цитомегаловирусов, ВИЧ-1.

Препараты, ингибируюшие обратную транскриптазу, рассмотрены в разделе 17.1.11.

**Препараты, ингибирующие процессы формирования новых вирионов**

1. Производный тиосемикарбизонов (метисазон) блокирует поздние стадии вирусной репликации, вызывая образование несформировавшихся неинфекционных вирусных частиц. Активен в отношении вируса натуральной оспы.
2. Ингибиторы вирусных ферментов. К ним относятся синтетические пептиды, которые, внедряясь в активный центр фермента, подавляют его активность. К этой группе препаратов относится ингибитор вирусной нейраминидазы вирусов гриппа А и В оселтамивир. В результате действия ингибиторов нейраминидазы не происходит отпочковывания новых вирионов из клетки.

Развитие ретровиорусов, в частности ВИЧ, включает расщепление вирусной протеазой образованного в процессе трансляции вирусной иРНК полипептида на функционально-активные фрагменты. Ингибиция протеазы приводит к формированию неинфекционных вирионов. Ингибиторами протеазы ретровирусов являются препараты ритонавир, индинавир.

К *вирулицидным препаратам*, которые инактивируют внеклеточные вирионы, относятся: оксалин, эффективный против вирусов гриппа, герпеса; алпизарин и ряд других.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

А. Антибиотики могут действовать на:
1. Бактерии.
2. Вирусы.
3. Грибы.
4. Простейшие.
5. Прионы.

Б. Укажите основные группы антибиотиков, нарушающих синтез клеточной стенки:
1. Тетрациклины.
2. β-Лактамы.
3. Линкозамины.
4. Гликопептиды.
5. Полиены.

В. Укажите группы синтетических микробных препаратов:
1. Полиены.
2. Сульфаниламиды.
3. Имидазолы.
4. Хинолоны.
5. Аминогликозиды.

Г. Укажите группы антимикробных препаратов, нарушающих биосинтез белка:
1. Оксазолидиноны.
2. Тетрациклины.
3. Аминогликозиды.
4. Фторхинолоны.
5. Карбопинемы.

Д. Осложнения со стороны макроорганизма:
1. Дисбиоз.
2. Эндотоксический шок.
3. Анафилактический шок.
4. Нарушение кроветворения.
5. Токсическое действие на слуховой нерв.

Е. Во врачебной практике для лечения инфекционных процессов применяют комбинированные препараты, состоящие из комбинации амоксициллин + клавулиновая кислота и ампициллин + сумбактам. Объясните их преимущество перед отдельными антибиотиками.

# Глава 8

# УЧЕНИЕ ОБ ИНФЕКЦИИ

## 8.1. Инфекция. Формы инфекционного процесса

Понятия «инфекция» и «инфекционная болезнь» не являются синонимами.

Понимая под инфекцией взаимодействие патогенного (болезнетворного) микроорганизма и восприимчивого (чувствительного) хозяина в определенных условиях внешней среды, следует заметить, что инфекционная болезнь — это крайняя степень проявления инфекционного процесса, когда образуется патологический очаг и появляется специфическая клиническая симптоматика.

В основе инфекции лежит феномен паразитизма, определяющий антагонистические взаимоотношения симбионтов.

Классифицируют различные формы инфекционного процесса (инфекции) в зависимости от природы патогена, происхождения, условий возникновения инфекции, характера и длительности ее течения и т.д.

В зависимости от природы патогена, принадлежности к определенному таксону существует классификация инфекций по *этиологическому принципу: бактериальные* (дизентерия, сальмонеллез, дифтерия, туберкулез, гонорея и т.д.), *вирусные* (грипп, ВИЧ-инфекция, оспа, энцефалит, бешенство и т.д.), *грибковые* (кандидоз, аспергиллез, трихофития и др.), *протозойные* (малярия, токсоплазмоз, лямблиоз), *прионные* (куру, болезнь Крейтцфельда–Якоба, скрепи).

Если геном возбудителя интегрируется (встраивается) в геном хромосомы хозяина, то возникший инфекционный процесс может передаваться по наследству через генетический материал из поколения в поколения хозяина. Это интегративная форма инфекции. Примером интегративной формы инфекции являются инфекции

вирусной этиологии (лизогения в микробном мире, концерогенез — раковые линии мышей). Большинство инфекций, которыми болеет человек, *по наследству не передаются* (туберкулез, холера, грипп и т.д.) и называются неинтегративными. Нельзя путать интегративную форму инфекции с врожденной, когда возбудитель передается от матери плоду через плаценту (сифилис, ВИЧ-инфекция и т.д.), или новорожденный во время родов инфицируется при прохождении через родовые пути матери (бленнорея).

По происхождению инфекции делят на экзогенные и эндогенные.

*Экзогенная* инфекция возникает при попадании возбудителя в организм извне. Для экзогенной инфекции обязательно наличие трех элементов эпидемического процесса: источник инфекции, механизм передачи патогена, восприимчивый организм. Например, для сифилиса: источник инфекции — больной человек, механизм передачи патогена половой, восприимчивый организм — человек. *Эндогенная* (оппортунистическая) инфекция вызывается *представителями нормальной микрофлоры при снижении защитных сил организма* (иммунодефицитные состояния). Возбудители эндогенной инфекции относятся к условно-патогенным видам микроорганизмов. Пример эндогенной инфекции — фурункул носа стафилококковой этиологии (*Staphylococcus epidermidis*). Инфекция возникла при переохлаждении организма и развитии местного иммунодефицита слизистой оболочки носа. Эндогенная инфекция может развиться и при перемещении микроорганизмов из одного биотопа человека в другой за счет искусственного переноса руками, инструментами либо естественного перехода микроорганизма — его транслокации (миграции). Пример такой формы — эшерихиозный цистит, возбудитель *Escherichia coli*, которая попала на слизистую оболочку мочеполовой системы из кишечника.

По локализации патогена в организме различают местную и генерализованную формы инфекции. *Местная* или очаговая инфекция *имеет место, когда возбудитель локализуется в определенном* органе либо ткани и не распространяется по организму. Например, при ангине возбудитель (чаще всего *Streptococcus pyogenes*) находится на слизистой оболочке миндалин; при фурункулезе возбудитель *Staphylococcus aureus* — в волосяном фолликуле.

При *генерализованной* инфекции патоген распространяется по организму, преодолевая различные защитные барьеры: лимфоид-

ную ткань, гематоэнцефалический барьер, фасции мышечной ткани, соединительную ткань и т.д. Кровь является одним из частых путей распространения патогена — гематогенный путь. Если возбудитель, распространяясь по крови, не размножается в ней, то такое явление называют **бактериемией** или вирусемией (в зависимости от принадлежности патогена к той или другой таксономической группе). В случае, когда бактерии размножаются в крови, развивается одна из тяжелых форм генерализованной инфекции — **сепсис**. Сепсис может перейти в **септикопиемию**, когда патоген размножается во внутренних органах, вызывая в них образование гнойных очагов воспаления. При высокой концентрации бактерий и их токсинов в крови может развиться токсико-септический шок за счет массивного поступления токсинов. Вследствие генерализации инфекции поражаются различные органы и ткани организма (менингококковый менингит, туберкулез позвоночника).

Инфекционный процесс классифицируется в зависимости от числа проникших в организм видов патогена и динамики их действия. *Моноинфекция* вызывается патогеном одного вида (туберкулез, дифтерия). *Смешанная (микст) инфекция* — одновременное заражение двумя видами возбудителей и более и развитие сразу нескольких заболеваний (ВИЧ-инфекция и гепатит В при заражении через шприц у наркоманов; сифилис, гонорея и хламидиоз при половом заражении). *Реинфекция* — повторное заражение тем же видом возбудителя после выздоровления. Реинфекция возможна при заболеваниях, после которых не остается стойкий иммунитет: после гонореи, сифилиса, дизентерии. Если повторное заражение происходит тем же возбудителем до выздоровления, то возникает *суперинфекция* (сифилис). *Вторичная инфекция* возникает на фоне развившегося первичного заболевания и вызывается другим видом возбудителя. Вторичная инфекция может быть экзогенной или эндогенной. Чаще вторичная инфекция развивается как эндогенная, когда вследствие ослабления организма первичным заболеванием представители нормальной микрофлоры тела человека вызывают вторичное заболевание как осложнение первичного, например, при гриппе развивается стафилококковая пневмония, при СПИДе — пневмоцистная пневмония.

По длительности течения различают острые и хронические инфекции. Острые инфекции протекают непродолжительное время, их срок исчисляется днями, неделями (грипп, корь, холера, чума).

Хронические инфекции протекают в течение нескольких месяцев, лет (бруцеллез, туберкулез, сифилис). При определенных условиях (неэффективное лечение) острые инфекции могут переходить в хронические (гонорея, дизентерия). Хронические инфекции протекают в виде **ремиссии** и **рецидива**, которые сменяют друг друга. При ремиссии больной может чувствовать себя удовлетворительно, клинические симптомы болезни могут не проявляться либо проявляются в незначительной степени. При рецидиве имеют место обострение патологического процесса, выраженность клинической картины. *При хроническом инфекционном процессе возбудитель* персистирует в организме хозяина, т.е. длительно паразитирует в его тканях и клетках.

Особенности эпидемиологии инфекционного процесса позволяют классифицировать несколько форм инфекции. *Эпидемической* называется инфекция, когда ею охвачено население больших территорий (одной или нескольких стран), например грипп, холера.

*Эндемическая* инфекция локализуется в определенной географической местности, где возбудитель циркулирует между определенными видами животных в данной географической местности (чума, бруцеллез, туляремия).

В зависимости от источников заражения человека различают *антропонозные, зоонозные* и *сапронозные* инфекции. При *антропонозных* инфекциях единственным источником заражения является человек (ВИЧ-инфекция, сифилис). При *зоонозных* инфекциях основным источником заражения являются животные (бешенство, сибирская язва, бруцеллез). Возбудителями *сапронозных* инфекций являются сапрофиты, обитающие во внешней среде (легеонеллезы, листериоз). Следовательно, источниками заражения сапронозами являются объекты внешней среды: почва (столбняк, газовая гангрена), вода (лептоспирозы).

В настоящее время большое распространение получила *госпитальная* (внутрибольничная) инфекция, которая возникает в лечебно-профилактических учреждениях (стационарах, родильных домах и т.д.). Источником возникновения госпитальной инфекции часто является медицинский персонал: бактерионосители стафилококков, энтеробактерий и других условно-патогенных или патогенных микроорганизмов.

Типичное инфекционное заболевание чаще всего протекает в манифестной форме и характеризуется определенными клиническими

проявлениями (симптомокомплексом) и циклическим течением. Например, при типичном течении брюшного тифа наблюдается тифозный статус, развивается розеолезная сыпь на 8–10-й день болезни и т.д. Болезнь протекает стадийно и продолжается 3–4 нед.

Возможно атипичное (стертое) течение болезни без характерного симптомокомплекса. При стертом течении брюшного тифа сыпь появляется рано (на 4–6-й день), скудная; тифозный статус не выражен. В ряде случаев болезнь может протекать вообще без проявления каких-либо симптомов, и результат развившегося патологического процесса может проявиться лишь в виде смертельно опасных осложнений (легочное кровотечение при бессимптомно протекающем туберкулезе легких, перитонит как следствие перфорации кишечника брюшнотифозными язвами, порок сердца как следствие ревматического эндокардита).

Инфекционный процесс может протекать в форме бессимптомной инфекции: *латентной* (скрытой) или *бактерионосительства* (вирусоносительства). При *латентной* форме инфекции возбудитель длительное время находится в организме (персистирует), но не проявляет своего патогенного действия. Например, туберкулезная палочка может персистировать многие годы в ткани легкого здорового человека, вирус герпеса пожизненно персистирует в чувствительных ганглиях тройничного нерва, возбудитель бруцеллеза персистирует в мезентериальных лимфатических узлах. При латентной инфекции возбудитель не выделяется во внешнюю среду, латентная инфекция может переходить в манифестную форму (болезнь) при снижении иммунитета.

*Бактерионосительство* — длительное или кратковременное пребывание возбудителя в организме здорового человека. В отличие от латентной инфекции, бактерионосители выделяют возбудителя в окружающую среду и являются источниками распространения инфекции (брюшной тиф, дифтерия, стафилококковая инфекция). *Медленная инфекция* характеризуется персистенцией патогена, при которой имеет место многомесячный или многолетний инкубационный период, после которого медленно, но неуклонно развиваются симптомы заболевания, всегда заканчивающегося летально (ВИЧ-инфекция, бешенство, проказа).

В развитии инфекционной болезни выделяют 4 основных периода: *инкубационный, продромальный, разгар болезни* и *реконвалесцентный* (выздоровление).

*Инкубационный* период — период адгезии возбудителя на чувствительные клетки организма в месте входных ворот. Это могут быть миндалины, верхние дыхательные пути, слизистая оболочка желудочно-кишечного, репродуктивного тракта и др. В окружающую среду возбудитель не выделяется. Длительность периода от нескольких часов (грипп), дней (чума, туляремия, дифтерия) до нескольких месяцев (бешенство) и даже лет (СПИД, проказа, губчатая энцефалопатия).

В *продромальный* период имеет место колонизация чувствительных клеток, участков организма возбудителем. Осуществляется расселение микроорганизмов в биотопе хозяина и начинают появляться неспецифические (общие) симптомы болезни (повышается температура, возникают головная боль, потоотделение, слабость и др.). В этот период возбудитель также, как правило, не выделяется в окружающую среду.

Последующее интенсивное размножение возбудителя в организме хозяина знаменует *разгар болезни* с появлением специфической симптоматики (высыпания на коже при тифах, параличи нижних конечностей при полиомиелите, пленчатые налеты на слизистых оболочках носа, зева, гортани при дифтерии и др.). В этот период больной заразен, так как возбудитель выделяется во внешнюю среду. Наконец, после прекращения размножения возбудителя и по мере выведения его из организма наступает период реконвалесценции (выздоровления). К этому моменту начинается восстановление нарушенных функций. Как правило, прекращается выделение микроорганизмов, но в некоторых случаях возможно формирование реконвалесцентного бактерионосительства с длительным пребыванием возбудителя в организме хозяина, перенесшего инфекцию.

Особое место при характеристике инфекции имеют пути ее передачи, что важно для эпидемиологических целей. Существуют три основных варианта передачи возбудителя человеку: горизонтальный, вертикальный и артифициальный (искусственный).

Горизонтальный вариант включает воздушно-капельную передачу возбудителя от больного здоровому (грипп, дифтерия); фекально-оральный (холера, брюшной тиф), контактный (сифилис, гонорея) и трансмиссивный (чума, энцефалиты) пути.

Для вертикального варианта типичен трансплацентарный путь передачи возбудителя от матери плоду (сифилис, краснуха) или в родах от матери новорожденному (бленнорея).

Артифициальный (рукотворный, искусственный) вариант предусматривает передачу возбудителя при инструментальном обследовании больного, введении инъекций, при оперативных вмешательствах (гепатиты, СПИД).

Различают 4 уровня инфекционного процесса: популяционный, организменный, клеточный и молекулярный.

Популяционный уровень определяет взаимодействие возбудителя с восприимчивыми особями популяции. Для *организменного* уровня важен комплекс (система) реакций восприимчивого хозяина на инфекцию. Клеточный или тканево-органный уровень — это выбор возбудителем соответствующих клеток-мишеней макроорганизма. На *молекулярном* уровне рассматривается конкурентное взаимодействие биомолекул патогена и хозяина в условиях инфекции.

## 8.2. Движущие силы инфекционного процесса

Исходя из определения инфекционного процесса, выявляют, по крайней мере, 3 основных участника инфекции: *возбудитель, хозяин* и *факторы внешней среды*.

*Возбудитель* болезни — микробная клетка — характеризуется количественными и качественными характеристиками: патогенностью (видовой признак) и вирулентностью (индивидуальная характеристика штамма).

Платформа, на которой развертывается инфекция, — это организм человека-*хозяина*, который должен быть восприимчив к инфекту (видовой признак) и быть чувствительным к нему (индивидуальная характеристика), т.е. иметь инфекционную чувствительность. При этом физиологические характеристики хозяина, состояние его естественной резистентности играют при этом далеко не последнюю роль.

И наконец, третий участник инфекции — *условия внешней среды*, в которой происходит инфицирование организма возбудителем. Различные физические, химические, биологические и социальные факторы среды имеют существенное значение для формирования и развития инфекционного процесса. При гибели патогена либо хозяина инфекционный процесс прерывается. В условиях же взаимной адаптации патогена и хозяина (персистенции патогена) имеет место продолжение инфекционного процесса в форме рези-

дентного бактерионосительства, латентной инфекции или хронического заболевания. Факторы внешней среды, хотя и в различной степени, участвуют в формировании инфекционного процесса, определяя его развитие и исход.

Таким образом, возникновение, течение и исход инфекционного процесса зависят от качественных и количественных характеристик партнеров в каждой конкретной ситуации взаимодействия паразит–хозяин. Скажем, при чуме и ВИЧ-инфекции ведущая роль в развитии инфекционного процесса принадлежит возбудителю, ибо он почти в 100% случаев вызывает болезнь и высокую летальность (исключается факт вакцинации). Развитие эндогенных, вторичных инфекций, вызываемых условно-патогенными микробами (*Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli* и др.), во многом определяют защитные силы хозяина. Для возникновения госпитальных инфекций (стафилококковые и др.) важное значение имеет как иммунный статус хозяина, так и состояние противоэпидемических мероприятий в лечебно-профилактическом учреждении, т.е. условия внешней среды. По какому сценарию будет развиваться инфекция, это и определяют движущие силы инфекционного процесса.

## 8.3. Роль возбудителя в инфекционном процессе и его основные биологические характеристики

Возбудитель как участник инфекционного процесса характеризуется двумя основными качествами: патогенностью и вирулентностью.

*Патогенность* — видовой признак: способность определенного вида микроорганизмов вызывать соответствующий инфекционный процесс у одного или нескольких видов организма хозяина. Например, патогенные виды *Vibrio cholerae*, *S. Typhi*, *N. gonorrhoeae* способны вызывать соответствующую инфекцию у человека, но не у других видов.

Но этот диапазон (спектр) патогенности у разных микробов различный. Если названные микроорганизмы (печальная «привилегия» рода человеческого) патогенны только для человека, то число восприимчивых хозяев для других микроорганизмов значительно больше и не ограничивается только человеком. Для *Mycobacterium tuberculosis* составляет 9 видов, *Y. pestis* — 11 видов, *Br. abortus* —

21 вид, а для *F. tularensis* — 141 вид, включая не только животных, но и птиц. Диапазон патогенности микробов сформировался в результате длительной эволюции системы паразит–хозяин. Отсюда и разные корни происхождения патогенных видов микроорганизмов.

От возбудителей болезней предков человека — человекообразных обезьян произошли вирусы герпеса и иммунодефицита человека, малярийный плазмодий. Микробы — паразиты членистоногих — способствовали отбору возбудителей сыпных тифов (риккетсиозов). Нормальная микрофлора тела человека — родоначальник возбудителей дизентерии, дифтерии, полиомиелита. Дикие животные до появления человека страдали от бешенства, чумы, туляремии. От домашних животных к человеку перешли такие болезни, как корь, брюшной тиф, натуральная оспа. Микробы-сапрофиты дали начало возбудителям холеры, сифилиса, лептоспирозов.

Патогенные виды микробов реализуют свою способность вызывать инфекционный процесс у большинства особей популяции восприимчивого вида макроорганизма.

Если же способность микроба вызывать инфекцию у восприимчивого вида макроорганизма в значительной степени определяется состоянием иммунитета особей популяции и, как правило, инфекция развивается в условиях иммунодефицита, то такие виды микробов называются условно-патогенными, например *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis*, *Klebsiella pneumoniae*.

*Вирулентность* — индивидуальный, штаммовый признак: степень (количественная мера) реализации патогенности вида каждым конкретным штаммом по отношению к конкретному индивидууму — хозяину. Если штамм *Vibrio cholerae* выделен от больного А, погибшего от холеры, значит, он оказался по отношению к этому индивидууму высоковирулентным. Степень вирулентности конкретного штамма внутри популяции патогенного вида микроорганизмов можно оценивать по клиническому течению инфекционного процесса у человека, от которого выделен данный штамм; на модели *in vivo* путем воспроизведения экспериментальной инфекции на животных; на модели *in vitro* путем качественного и количественного изучения факторов вирулентности конкретного штамма (клинико-лабораторные исследования).

На модели экспериментальной инфекции проводят количественную оценку вирулентности штамма, используя условно при-

нятые единицы измерения вирулентности: DLM и $LD_{50}$. DLM (от лат. *Dosis letalis minima*) — наименьшее количество микробных клеток, способное вызвать гибель 95% животных восприимчивого вида определенной массы, пола и возраста при определенном способе заражения и в течение заданного времени. $LD_{50}$ — количество бактерий, вызывающее гибель 50% животных в эксперименте. В ряде случаев с экспериментальной целью определяют DCL (от лат. *Dosis certa letalis*) — смертельную дозу, вызывающую 100% гибель инфицированных животных.

Вирулентность возбудителя можно регулировать в сторону как ее снижения, так и повышения. В свое время французские исследователи Кальмет и Жерен культивировали возбудитель туберкулеза (бычьего типа) на картофельно-глицериновых средах с добавлением желчи (неблагоприятный фактор для возбудителя) в течение 13 лет. В результате им удалось осуществить около 230 посевов возбудителя, потерявшего вирулентность, и на основе авирулентного штамма создать вакцину БЦЖ (бациллы Кальмета–Жерена) для профилактики туберкулеза. В ряде случаев вирулентность микробов снижается под воздействием различных физико-химических факторов, лекарств и т.д. Снижение вирулентности штаммов называют *аттенуацией* (ослаблением).

С другой стороны, известно, что путем пассажа (проведения) через организм восприимчивых животных удается повысить вирулентность возбудителя, что нередко бывает необходимо при проведении экспериментальных работ.

К условиям, регулирующим вирулентность возбудителя, относят химический состав бактерийной клетки, особенности ее метаболизма, структуру генома и среду обитания (экологию).

### 8.3.1. Факторы вирулентности

Классификация факторов вирулентности зависит от их структуры, происхождения, механизма действия и назначения.

По структуре и происхождению факторы вирулентности можно классифицировать на две основные группы: структурные компоненты бактериальной клетки и секретируемые факторы.

#### *8.3.1.1. Структурные компоненты бактериальной клетки*

К ним относятся капсула, пили, пептидогликан клеточной стенки, белки наружной мембраны и липополисахарид грамотри-

цательных бактерий, которые подробно изложены в материалах диска.

*8.3.1.2. Секретируемые факторы*

Помимо структур бактериальной клетки, способствующими проявлению ее вирулентных качеств, известна группа микробных секретируемых факторов, участвующих в инфекционном процессе: бактериоцины, экзотоксины, ферменты «защиты и агрессии», секретируемые факторы персистенции.

*Бактериоцины* — белки, медиаторы межмикробного взаимодействия, секретируются бактериальной клеткой в качестве антагонистически активных веществ. Бактериоцины выделяются в условиях близкородственного антагонизма внутри вида, рода бактерий. Бактериоцины обеспечивают колонизацию вирулентным штаммом определенного биотопа, подавляя нормальную микрофлору: колицины *Shigella flexneri* подавляют *Escherichia coli*, стафилококцины *S. aureus* подавляют *S. epidermidis* и т.д. Колициногенные штаммы шигелл чаще вызывают затяжные и более тяжелые формы заболевания, чем неколициногенные. Бактериоциногенные штаммы стафилококков значительно чаще выделяются от больных из патологических очагов, чем с кожи и слизистых оболочек здоровых людей. При хронических формах стрептококковой инфекции (ревматизм, хронический тонзиллит) бактериоциногенные штаммы обнаруживаются в 2 раза чаще, чем у здоровых людей.

*Экзотоксины* — вещества белковой природы, секретируемые вирулентными штаммами микроорганизмов и оказывающие токсическое действие на клетки и ткани организма хозяина.

К факторам вирулентности относятся и ферменты, продуцируемые бактериальной клеткой. Ферменты вирулентности образно называют ферментами «защиты и агрессии». Ферменты *защиты* обеспечивают устойчивость патогена к иммунитету хозяина: фермент коагулаза свертывает плазму крови, вследствие чего вокруг бактериальной клетки образуется защитная капсула; протеазы иммуноглобулинов разрушают антитела. *Ферменты агрессии* обеспечивают распространение патогена по организму, они разрушают структуры клеток и тканей организма: гиалуронидаза разрушает соединительную ткань (*S. aureus*, *S. pyogenes*), нейраминидаза расщепляет сиаловые кислоты оболочек клеток (вирус гриппа), фибринолизин растворяет сгустки фибрина (*S. pyogenes*), ДНКаза

разрушает нуклеиновые кислоты (*S. aureus*), эластаза расщепляет лизоцим клеток организма (*Pseudomonas*).

*Ферменты метаболизма* бактерий, вызывающие образование токсичных веществ при расщеплении субстратов организма, также рассматривают в качестве ферментов вирулентности: микробная уреаза при гидролизе мочевины образует токсичные вещества (*Helicobacter pylori*), декарбоксилаза при разрушении белка способствует накоплению биогенных аминов (*Salmonella Enteritidis*). Вирулентность бактерий обеспечивается ферментами супероксиддисмутазой и каталазой, которые инактивируют высокоактивные кислородные радикалы при фагоцитозе (*Leg. pneumophila*, *M. tuberculosis*).

*Секретируемые факторы персистенции бактерий* подавляют специфические и неспецифические механизмы защиты хозяина, обеспечивая бактериям выживание при инфекции. По химической природе это в основном бактерийные протеазы, расщепляющие специфический субстрат хозяина, создающий ему защиту от патогена. Они обеспечивают антилизоцимную, антиинтерфероновую, антикомплементарную, антигистоновую, антилактоферриновую и антигемоглобиновую активность. Подробно изложено в материалах диска.

В реализации вирулентности возбудителя важна доставка вирулентных протеинов на поверхность бактериальной клетки в место контакта ее с поверхностью эукариотической клетки и/или введения протеинов в цитозоль клетки хозяина. В процессе эволюции у бактерий выработано несколько типов секреторных систем, которые подробно описаны в разделе 3.1.5. Термин «секреция» используется для описания активного транспорта протеинов из цитоплазмы через внутреннюю и наружную мембраны в супернатант (окружающую среду) бактериальной культуры или на поверхность бактериальной клетки. Секреция отличается от экспорта, который заключается в транспортировке протеинов из цитоплазмы в периплазматическое пространство. Напомним, что I тип секреторной системы является *sec*-независимым путем (не находится под контролем *sec*-гена, отвечающего за секрецию). Этим путем транспортируются α-гемолизин *E. coli*, внеклеточная аденилатциклаза *B. pertussis*, протеазы *P. aeruginosa*. Молекулы, транспортируемые I типом секреторной системы, требуют для транспортировки 3–4 вспомогательные молекулы, участвующие в образовании трансмембранного канала, через который и происходит выход протеинов.

II тип секреции — основной для экстраклеточных расщепляющих энзимов грамотрицательных бактерий. Эта система использует традиционные *sec*-зависимые пути для выведения экспортируемых молекул через внутреннюю мембрану в периплазматическое пространство. II тип секреторной системы участвует в экспорте огромного количества разнообразных молекул, включая вирулентные факторы: пили у *P. aeruginosa* (4 типа) и родственные им, энзим-*pullulanase* у *Klebsiella*, пектические энзимы и целлюлазы у *Erwinia*, эластазы, экзотоксин А, фосфолипазы С и другие протеины у *Pseudomonas aeruginosa*, амилазы и протеазы у *Aeromonas hydrophila* и т.д.

III тип секреторной системы — большая экспортная система, независимая от *sec*-системы, которая играет существенную роль в секреции вирулентных факторов у возбудителей болезней человека и растений. III тип секреторной системы отвечает за секрецию наружных протеинов *Yersinia spp.*, факторов инвазии и вирулентности сальмонелл и шигелл, молекул сигнальной трансдукции энтеропатогенной кишечной палочки и вирулентных факторов некоторых возбудителей заболеваний растений, а также вовлечен в биосинтез поверхностных органелл — флагеллярных белков.

В отличие от I типа секреторного пути, являющегося истинной секреторной системой, в котором секреторные энзимы приобретают активность в экстраклеточном пространстве, тип III — это механизм для транслокации протеинов в цитозоль эукариотической клетки, ибо он обеспечивает сборку на поверхности бактериальной клетки супермолекулярных структур, участвующих в транспорте протеинов в эукариотическую клетку. Аппарат III типа секреторной системы включает около 20 протеинов, большинство которых располагается во внутренней мембране, и цитоплазматическую мембранно-связанную АТРазу (АТФазу).

V тип секреторной системы включает группу так называемых аутотранспортеров — семейство секреторных протеинов, осуществляющих свой собственный транспорт из бактерий: гонококковую IgA-протеазу и IgA-протеазу *H. influenzaece*.

### 8.3.2. Патогенетические факторы возбудителя при инфекции

Классификация факторов патогенности по назначению и механизму действия включает патогенетически значимые продукты

бактерийной клетки, определяющие этапность развития инфекционного процесса и его исход. Эти факторы объединяют в 4 группы: колонизации, инвазии, токсигенности и персистенции.

*8.3.2.1. Факторы колонизации патогена*

Колонизация — расселение микроорганизмов в определенном биотопе хозяина. Этот этап инфицирования организма начинается с *адгезии — прикрепления возбудителя к клеткам организма* у входных ворот инфекции. За прикрепление микроба отвечают специальные структуры — адгезины. У грамотрицательных бактерий в этот процесс включаются пили (ворсинки), белки наружной мембраны, а у грамположительных микроорганизмов — тейхоевые кислоты, поверхностные белки. Адгезия специфична у каждого возбудителя с учетом его тропности к тканям, клеткам хозяина, где и осуществляется рецепторлигандное прикрепление возбудителя. Последующее закрепление возбудителя на эукариотических клетках организма вызывает расселение микроорганизмов в инфицированном биотопе хозяина. Этому способствуют участие бактериальных протеаз, блокирующих секреторную защиту организма IgA, продукция бактериоцинов, антиоксидантов, продукция сидерофоров, конкурирующих с лактоферрином за ионы Fe. Таким образом, адгезия и последующая колонизация — начальные (ранние) стадии патогенеза инфекционного процесса.

*8.3.2.2. Факторы инвазии микроорганизмов*

Инвазия — проникновение возбудителя внутрь клеток организма (пенетрация), преодоление естественных барьеров организма (кожа, слизистые оболочки, лимфатическая система и др.). Этим процессом управляют инвазины — молекулы бактерий, способствующие проникновению патогена в клетку. В этот период усиливается действие токсичных продуктов — уреаза осуществляет гидролиз мочевины с образованием в организме аммиака, токсичных биогенных аминов. Микроорганизмы продуцируют гемолизин, разрушающий эритроциты, лейкоцидин, разрушающий лейкоциты, спридинг-факторы — ферменты агрессии, способствующие генерализации инфекции за счет распространения возбудителя в организме. Включаются в работу такие ***ферменты агрессии***, как *лецитовителлаза*, расщепляющая липопротеид мембран клеток хозяина, *фибринолизин*, устраняющий сгусток фибрина для дальнейшего распространения микроба по организму; *гиалуронидаза*,

расщепляющая гиалуроновую кислоту — вещество соединительной ткани; *нейраминидаза* — фермент распространения патогена, IgA-протеаза, обеспечивающая устойчивость возбудителя к перевариванию фагоцитами и действию антител и др. Процесс инвазии у некоторых грамотрицательных бактерий обеспечивается III типом секреторной системы, которая отвечает за секрецию факторов инвазии, в частности, у сальмонелл и шигелл, молекул сигнальной трансдукции энтеропатогенной кишечной палочки. В процессе инвазии в эпителиальные клетки возбудитель (*S. Typhimurium*) вступает в интимные отношения с клетками и использует физиологические механизмы обеспечения их жизнедеятельности для обслуживания собственных нужд, вызывая массивную реаранжировку цитоскелета клетки хозяина и активацию вторичных мессенжеров — транзитное повышение уровня инозитолтрифосфата и выброс $Ca^{2+}$.

В защите от фагоцитоза принимают участие как поверхностные структуры бактериальной клетки, так и продуцирумые ею вещества. Антифагоцитарной активностью обладают капсулы (*S. pneumoniae*, *N. meningitidis*), поверхностные белки: А белок у *S. aureus*, М-протеин у *S. pyogenes*. Некоторые бактерии, например возбудитель коклюша, продуцируют внеклеточную аденилатциклазу, ингибирующую хемотаксис, таким образом позволяя бактерии избежать захвата фагоцитами. Ферменты супероксиддисмутаза и каталаза инактивируют высокореактивные кислородные радикалы при фагоцитозе (*Y. pestis*, *L. pneumophila*, *S. Typhi*). Отмечено участие секреторной системы III типа у некоторых бактерий в реорганизации цитоскелета фагоцита, предотвращающее образование фаголизосомы.

### *8.3.2.3. Факторы токсигенности бактерий*

Токсигенность — продукция бактериями токсичных веществ, повреждающих клетки и ткани организма хозяина.

*Наличие токсина* у бактерий *является патогенетически значимым* в ходе развития инфекционного процесса. Токсичный компонент присутствует практически при любой инфекции и проявляет свое действие, хотя и в разной степени.

Токсины, секретируемые возбудителем в среду, обнаруживаются в фазе роста и накапливаются в цитоплазме. Это белки — *экзотоксины*. *Эндотоксины* входят в состав клеточной стенки и высвобождаются лишь при гибели микробной клетки.

К эндотоксинам относят ЛПС клеточной стенки грамотрицательных бактерий, пептидогликан, тейхоевые и липотейхоевые кислоты, гликолипиды микобактерий. Хорошо изучены эндотоксины энтеробактерий (эшерихии, шигеллы, сальмонеллы, бруцеллы). Некоторые бактерии одновременно образуют как экзо-, так и эндотоксины (холерный вибрион, некоторые патогенные кишечные палочки и др.).

Сравнительная характеристика бактериальных экзотоксинов и эндотоксина ЛПС клеточной стенки грамотрицательных бактерий представлена в табл. 8.1.

**Таблица 8.1.** Сравнительная характеристика токсинов бактерий

| Экзотоксины | Эндотоксины (ЛПС грамотрицательных бактерий) |
|---|---|
| 1. Выделяются микробом в среду | 1. Освобождаются при разрушении бактерий |
| 2. Белки | 2. Глюцидолипидно-протеиновый комплекс |
| 3. Термолабильны (60–80 °С,10 мин) | 3. Термостабильны (120 °С, 30 мин) |
| 4. Высокотоксичны | 4. Слаботоксичны |
| 5. Органо-, цитотропны | 5. Не обладают избирательным действием на клетки |
| 6. Активные антигены. Высокая иммуногенность | 6. Слабые антигены |
| 7. Легко обезвреживаются (0,3–0,4% формалином 30 дней, 40 °С) | 7. Трудно обезвреживаются (трихлоруксусной кислотой) |
| 8. Образуют как грамположительные бактерии, так и грамотрицательные бактерии | 8. Образуют грамотрицательные бактерии |

Экзотоксины секретируются живой бактериальной клеткой, являются белками, полностью инактивируются под действием высокой температуры (90–100 °С). Они обезвреживаются формалином в концентрации 0,3–0,4% при 37 °С в течение 3–4 нед, при этом сохраняют свою антигенную специфичность и иммуногенность, т.е. переходят в *вакцину-анатоксин* (столбнячный, дифтерийный, ботулиновый, стафилококковый и др.).

Экзотоксины обладают специфичностью действия на клетки и ткани организма, определяя клиническую картину заболевания.

Специфичность экзотоксина определяется механизмом его действия на определенные мишени (табл. 8.2). Способность микробов к продукции экзотоксинов обусловлена в основном конвертирующими бактериофагами.

**Таблица 8.2.** Механизмы действия экзотоксинов

| Мишени действия токсина | Механизм действия токсина | Тип токсина | Вид бактерий-продуцентов |
|---|---|---|---|
| ЦПМ | Повышение проницаемости мембран | Гемолизины, лейкоцидин | *S. aureus*, *C. perfringens*, *S. pyogenes*, *C. tetani* |
| Ризосомы | Блок синтеза белка в клетке | Цитотоксины (энтеротоксины, некротоксины) | *C. diphtheriae*, *S. dysenteriae*, *S. aureus*, *C. perfringens* |
| Ферменты клеток | Активация клеточной аденилатциклазы | Энтеротоксины | *E. coli*, *S. typhimurium*, *V. cholerae*, *Y. enterocolitica* |
| | Блок передачи нервных импульсов | Нейротоксины | *C. tetani*, *C. botulinum* |
| Медиаторы межклеточного взаимодействия | Нарушение межклеточных связей | Эксфолиатины, эритрогенины | *S. aureus*, *S. pyogenes* |

Информация об эндотоксинах заложена в хромосомных генах бактерий, как и в любом другом клеточном компоненте.

Эндотоксины, в отличие от экзотоксинов, обладают меньшей специфичностью действия. Эндотоксины всех грамотрицательных бактерий (*E. coli*, *S. Typhi*, *N. meningitidis*, *Brucella abortus* и др.) угнетают фагоцитоз, вызывают падение сердечной деятельности, гипотонию, повышение температуры, гипогликемию. Большое количество поступившего в кровь эндотоксина приводит к токсикосептическому шоку.

Как и вирулентность, сила действия токсинов измеряется величиной летальных доз DLM, $LD_{50}$, *DCL*, определяемая на животных.

Токсины, повреждающие ЦПМ клеток организма, способствуют лизису клеток: эритроцитов (гемолизины стафилококков, стрептококков и др.), лейкоцитов (лейкоцидин стафилококков).

Разнообразна группа токсинов, нарушающих функцию ферментов клетки. Экзотоксин *C. diphtheriae*, являясь цитотоксином, блокирует синтез белка на рибосоме клеток миокарда, надпочечников, нервных ганглиев, эпителиоцитов слизистой оболочки зева. Развивается некроз клеток и тканей, воспаление: дифтеритическая пленка, миокардит, полиневрит. Энтеротоксины холерного вибриона, энтеротоксигенных штаммов *E. coli*, *S. aureus* и др. активируют аденилатциклазу в эпителиоцитах слизистой оболочки тонкой кишки, что приводит к повышению проницаемости стенки кишечника и развитию диарейного синдрома. Нейротоксины палочек столбняка и ботулизма блокируют передачу нервных импульсов в клетках спинного и головного мозга.

Особая группа токсинов стафилококков и стрептококков (эксфолиатины, эритрогенины) нарушает межклеточные взаимодействия, что приводит к поражению кожи (пузырчатка новорожденных, скарлатинозная сыпь) и других органов.

Эритрогенный токсин является суперантигеном, вызывает прлиферацию Т-клеток, активируя тем самым каскад компонентов эффекторного звена иммунной системы, выброс медиаторов с цитотоксическими свойствами — интерлейкинов, факторов некроза опухоли, γ-интерферона. Инфильтрация лимфоцитов и локальное действие цитокинов играют важную роль в патогенезе инвазивной стрептококковой инфекции при целлюлитах, некротических фасцитах, септических поражениях кожи, поражениях внутренних органов.

### *8.3.2.4. Факторы персистенции патогенов*

Персистенция возбудителя — форма симбиоза, способствующая длительному переживанию микроорганизмов в инфицированном организме хозяина (от лат. *persistere* — оставаться, упорствовать).

Переход бактерий из одной среды существования в другую (внешняя среда — клетка хозяина) — вынужденный ход микроорганизмов, позволяющий в конечном счете обеспечить им выживание как вида, поэтому персистенция бактерий в организме рассматривается как стратегия выживания вида. Смена экологической ниши бактериальной клеткой и ее переход в организм хозяина сопровождаются неизменным появлением новых биологических характеристик у бактерий, облегчающих адаптацию патогена к новым условиям среды обитания.

Выживание бактерий в тканях хозяина определяется *динамическим процессом равновесия между разрушением бактерий* защитными факторами организма и накоплением (размножением) бактерий, которые угнетают или избегают защитные механизмы макроорганизма.

При блокировании бактериями защитных механизмов хозяина, т.е. освоении ими экологической ниши, определенную роль играют структурные особенности патогена.

В отличие от вирусов или риккетсий, бактерии имеют свои особенности при персистировании, связанные со своеобразием строения бактериальной клетки. Наличие пептидогликана, который присутствует только у прокариот и отсутствует в эукариотических клетках, делает его отличной иммунологической мишенью в организме хозяина, быстро определяющем чужеродную субстанцию. Пептидогликан — маркер чужеродности бактерий в условиях инфицированного хозяина. Поэтому любые адаптационные процессы бактериальной клетки, направленные на защиту (или изоляцию) пептидогликановой структуры клеточной стенки, можно рассматривать в качестве механизмов персистенции бактерий.

В процессе взаимодействия обоих участников инфекции у возбудителя эволюционно закрепилось 4 способа защиты пептидогликана от факторов иммунитета: экранирование клеточной стенки бактерий; продукция секретируемых факторов, инактивирующих защиту хозяина; антигенная мимикрия; образование форм с отсутствием (дефектом) клеточной стенки бактерий (L-формы, микоплазмы).

Персистенция микроорганизмов — базовая основа формирования *бактерионосительства.*

В патогенетическом плане бактерионосительство — одна из форм инфекционного процесса, при которой наступает динамическое равновесие между микро- и макроорганизмом на фоне отсутствия патологических изменений, но с развитием иммуноморфологических реакций и антительного ответа.

Для бактерионосительства характерна взаимная адаптация паразита и хозяина в целях симбиоза и возможной персистенции патогена. При этом, с одной стороны, происходит селекция биоваров носительских штаммов с комплексом факторов колонизации, персистенции и патогенности, а с другой — имеет место перестройка механизмов защиты хозяина с формированием его иммуноком-

прометированного статуса (иммунный дисбаланс, толерантность, дефицит местного иммунитета). В итоге создаются условия для персистенции (выживания) возбудителя, что и приводит к бактерионосительству. (Подробно механизм развития персистенции и формирования бактерионосительства изложены в материалах диска.)

### 8.3.3. Генетика вирулентности бактерий

Рассматривать жизнь возбудителя в инфицированном организме, вероятно, следует как серию шагов генной активации в ответ на дискретный комплекс окружающих условий. Эта генная регуляция вирулентности бактерий является экологически зависимой, обеспечивающей пластичность микроорганизмов, их адаптивные потенции.

Известно, что бактерии обладают одним большим эволюционным механизмом, благодаря которому идет формирование патогенных представителей. Гены вирулентности чаще всего обнаруживаются в больших сложных блоках, обозначенных как хромосомные вставки или патогенные острова (см. подробнее раздел 5.1.5). Эти острова и островки связаны между собой общими последовательностями, что указывает на приобретение ДНК-сегмента с помощью таких событий, как «незаконные» рекомбинации, имеющие сходство с транспозицией или вставкой фага. Эти ДНК-блоки наиболее часто встраиваются в горячие точки хромосомы — наиболее восприимчивые участки к вторжению чужеродных ДНК или места встраивания фага. Например, большие сегменты ДНК, кодирующие различные вирулентные факторы, встроены в одно и то же место хромосомы как у уропатогенной, так и у энтеропатогенной *E. coli* — возбудителей двух различных заболеваний, причем последовательности, расположенные внутри патогенного островка, не обнаруживают гомологии с теми, что имеют место у непатогенных клонов, подобных *E. coli* K-12, но последовательности, непосредственно прилегающие к патогенному островку, демонстрируют общность у патогенных и непатогенных штаммов.

Регионы хромосомных ДНК, кодирующих несколько кластрированных генов вирулентности, общие среди микроорганизмов от возбудителей растений до *Helicobacter pylori* и *Yersinia pestis*. В то же время, несмотря на определенную консервативность (в частности,

хромосом *E. coli, S. Typhimurium*), бактериальные хромосомы не являются константными, а постоянно изменяются. Фенотипические изменения способны модифицировать патогенность внутри различных клональных вариантов одного вида. Например, хромосома *S. Typhi*, которая вызывает заболевание только у человека, подлежит большой геномной реаранжировке в ходе своей эволюции по сравнению с нетифоидными сальмонеллами, а именно инверсиям, транспозициям и вставкам через события гомологических рекомбинаций. Естественно, некоторые из этих событий могут изменять вирулентность *S. Typhi* и повышать ее специфические адаптационные способности к организму человека. Регуляцию и экспрессию хромосомных вирулентных факторов могут изменять и такие эпизоды, как перетасовка хромосомных генов.

Считают, что патогенные микроорганизмы эволюционируют не за счет медленной адаптивной эволюции предсуществующих генов, а через сумму скачков, как правило, овладевая генетическими сегментами (которые кодируют множественные вирулентные факторы) не только родственных, но и неродственных организмов, и включают даже эукариотические последовательности (приобретение тирозиновой фосфатазы *Yersinia*). В последующем приобретенная генетическая информация интегрируется в хромосому или стабильную плазмиду. Соответствующая селекция вирулентных факторов обеспечивает сохранность таких последовательностей у возбудителей, а распространение этой генетической информации через мобильные генетические элементы (многие вирулентные гены кодируются на мобильных генетических элементах ДНК) дает гарантию возможности получения любыми микроорганизмами селективных преимуществ. Информация, которая не является необходимой, в основном теряется, так как отсутствует селективное условие для ее сохранения.

Экспрессия факторов вирулентности тесно связана с различными сигналами окружающей среды, в том числе с температурой, концентрацией ионов, осмомолярностью, уровнем железа, pH, наличием источника углерода, уровнем кислорода и рядом других, пока не установленных. Возбудитель способен использовать как один сигнал, так и их комплекс, чтобы «почувствовать», какое микроокружение он оккупирует внутри хозяина или даже внутри специализированного компартмента единственной клетки хозяина. Поэтому на каждом шаге инфекционного цикла (в ходе

достижения бактериями своих биологических задач) в ответ на калейдоскоп защитных ответов хозяина происходят динамическое включение и выключение различных генов — согласованный и взаимообусловленный процесс.

Например, экспрессия одного из антифагоцитарных факторов возбудителя чумы, фракции $F_1$, экспрессируется максимально при 35–37 °С, когда возбудитель находится в организме человека, и падает при 28 °С при нахождении его в организме блохи. Инвазивные гены обычно включаются на ранней стадии инфекции, но репрессируются, когда бактерия оказывается внутри клетки хозяина. Дезорганизация экспрессии патогенных факторов во времени может разрушить процесс инвазии бактерий.

Таким образом, регуляция патогенности — это комплексное событие. Все вирулентные факторы могут контролироваться одновременно несколькими регуляторными системами, которые измеряют различные параметры окружающей среды, и в то же время несколько регуляторных систем могут регулировать один вирулентный фактор. Кроме того, регуляторные факторы обычно регулируют сами себя, что создает иерархию в регуляции и тонком контроле за экспрессией вирулентных факторов. В результате уровень вирулентности определяется средней величиной всех сигналов (окружения и регуляции).

## 8.4. Роль макроорганизма в инфекционном процессе

Организм хозяина — это платформа, на которой развертывается инфекционный процесс со всеми его проявлениями, и если микроб определяет специфичность инфекции, то особенности ее течения и формы проявления определяются состоянием макроорганизма.

Как и у микроба, здесь следует различать два основных признака: видовой и индивидуальный. Видовой признак — это восприимчивость хозяина к инфекту.

*Восприимчивость* — видовой признак, характеризующий способность определенного вида организмов (хозяев) участвовать в инфекционном процессе при взаимодействии с патогеном.

Организм человека восприимчив к холерному вибриону, но летучие мыши имеют врожденную устойчивость к этому возбудите-

лю. Для возбудителя туляремии организм зайцев, мышей, хомячков — подходящая ниша, где бактерии размножаются и вызывают инфекцию, но кошки, лисицы, хорьки генетически устойчивы к этому патогену. Ряд заболеваний характерен только для организма человека — сифилис, гонорея, дифтерия, так как подобрать других кандидатов для воспроизведения экспериментальной инфекции практически не удается за счет природной устойчивости животных к этим патогенам.

Что касается индивидуального признака, характеризующего меру восприимчивости организма к инфекции, то его определяют как инфекционную чувствительность.

*Инфекционная чувствительность* — это индивидуальная восприимчивость организма хозяина к патогену, вызывающему болезнь. Часто вместо термина «инфекционная чувствительность» используют термин с противоположным значением — «естественная резистентность», что делает эти понятия синонимами. Но и в том и в другом случае речь идет о врожденном (естественном) иммунитете, который, кроме своей неспецифичности в отношении к инфекту, всегда стойкий и передается по наследству, так как генетически запрограммирован.

Этот *естественный иммунитет* или *естественная резистентность* к патогену направлены на поддержание гомеостаза организма. Это неспецифическое распознавание чужеродной для хозяина информации (патогенов) осуществляется по единой программе, активность системы постоянная и не зависит от специфичности чужеродного агента. Он имеет как клеточную (клетки покровов и внутренних барьеров, фагоцитирующие клетки, естественные киллеры), так и гуморальную (лизоцим, комплемент, β-лизины, белки острой фазы и др.) основу. Среди факторов, определяющих естественную резистентность организма к инфекции выделяют: возраст хозяина, эндокринологический и иммунный статус, состояние физической активности, центральной нервной системы, эндогенные биологические ритмы, входные ворота инфекции и др.

*Возраст* существенно определяет уровень неспецифической защиты организма. У новорожденных в течение первого месяца жизни значительно снижена бактерицидная активность сыворотки крови. У детей чаще развиваются генерализованные формы инфекции, сепсис, тяжелее протекают многие инфекционные заболевания: сальмонеллезы, дизентерия, туберкулез и др. Только

*у новорожденных имеет место колиэнтерит, так как их организм* еще не вырабатывает секреторные IgA — основной фактор защиты слизистой оболочки тонкой кишки. Снижен уровень естественной резистентности у лиц пожилого возраста. В связи с нарушением функции лизосом у пожилых снижена активность внутриклеточного уничтожения патогена, поэтому они чаще болеют рецидивным сыпным тифом (болезнь Брилла) и чаще страдают от брюшнотифозного бактерионосительства.

Известен ряд болезней — коклюш, корь, дифтерия, которые типичны для детей. Лица пожилого возраста чаще погибают от пневмонии. Туберкулезная инфекция охватывает людей зрелого возраста.

*Есть незначительные различия в уровне показателей естественной резистентности* у лиц женского и мужского пола. У женщин выше, чем у мужчин, уровень бактерицидной активности сыворотки. Известно, что они более устойчивы к менингококковой и пневмококковой инфекции. Однако отдать предпочтение какому-либо полу в плане резистентности организма к инфекции затруднительно.

*Эндокринологический статус* человека имеет важное значение в регуляции уровня естественной резистентности. Гормон задней доли гипофиза окситоцин стимулирует активность фагоцитов, Т- и В-лимфоцитов. Глюкокортикоиды снижают уровень естественной резистентности, а минералкортикоиды повышают его. Больные сахарным диабетом чувствительны ко многим инфекциям, особенно к туберкулезу, фурункулезу стафилококковой этиологии. Снижение функции паращитовидных желез часто приводит к развитию кандидоза. Гормоны щитовидной железы стимулируют большинство факторов естественной резистентности. Их успешно используют для лечения сепсиса, вирусных гепатитов, менингококковой инфекции.

*Иммунный статус* человека определяет его индивидуальную чувствительность к отдельным инфекциям. Лица со II группой крови чаще болеют пневмонией и сепсисом стафилококковой этиологии, натуральной оспой, гриппом. У них ниже уровень интерферона в клетках и крови по сравнению с лицами с другой группой крови. Лица с I группой крови чаще подвержены чуме и проказе. Наличие в *HLA*-системе (комплекс гистосовместимости) антигена А9 способствует устойчивости этих лиц к острым респираторным

заболеваниям. Лица, у которых в *HLA*-системе есть антигены A10, B18, DR, болеют ими чаще.

*Состояние физической активности* человека регулирует уровень его естественной резистентности. Спортсмены-профессионалы, члены сборных команд высокочувствительны к инфекциям, так как интенсивные тренировки и участие в ответственных спортивных соревнованиях истощают резервы организма, снижают его естественную резистентность: уровень бактерицидной активности сыворотки, фагоцитарный потенциал нейтрофилов у классных спортсменов на фоне их высокой спортивной формы оказывается сниженным более чем в 2 раза по сравнению с лицами, занимающимися обычной физкультурой. В то же время занятия физкультурой и повышение двигательного режима являются средством усиления естественной резистентности организма к инфекции, что находит объяснение в нормализации уровня комплемента и лизоцима, в повышении способности крови к самоочищению.

*Центральная нервная система* принимает активное участие в регуляции уровня естественной резистентности организма к инфекции. Грызуны во время зимней спячки устойчивы к возбудителю чумы, но по мере просыпания весной погибают от чумной инфекции. Кролики во время медикаментозного сна резистентны к вирусу осповакцины, от которого они погибают во время бодрствования. В условиях стресса резко снижается естественная резистентность организма. У мышей после иммобилизационного стресса развивалась смертельная форма гриппозного энцефалита, тогда как в нормальных условиях мыши были резистентны к вирусу гриппа. Интересно, что на поверхности лимфоцитов и макрофагов имеются рецепторы к медиаторам нервной системы: β-адренорецепторы, холинорецепторы и др.

*Эндогенные биологические ритмы.* У человека с момента его рождения все процессы в организме протекают с определенной цикличностью. Выявлена определенная цикличность в динамике показателей естественной резистентности к инфекции (установлены месячные и суточные биоритмы).

Определены хронобиограммы иммунологических показателей здорового человека, что отражает различные временные интервалы максимальных значений факторов гуморальной и клеточной природы естественной резистентности. Это оказалось важным для

выбора времени оптимального введения лекарств больным при инфекционной патологии.

Значение для развития инфекции имеют и ее *входные ворота*. Входные ворота инфекции — место проникновения возбудителя в организм человека — во многом определяет возможность развития инфекционного процесса. Вирус гриппа, попав в кожу или на слизистую оболочку желудочно-кишечного тракта, не в состоянии вызвать заболевание. Грипп возникнет только при условии колонизации возбудителем слизистой оболочки верхних дыхательных путей. Существует понятие «колонизационная резистентность», которая определяет защитные возможности организма у входных ворот инфекции. В связи с этим инфекции разделяют на воздушно-капельные (грипп, менингококковая инфекция, дифтерия), кишечные (холера, дизентерия, гепатит А), инфекции наружных покровов (столбняк, газовая гангрена, бешенство), трансмиссивные (чума, малярия, туляремия).

### 8.4.1. Анатомо-физиологические барьеры организма при инфекции

Естественная резистентность организма включает ряд анатомо-физиологических барьеров, препятствующих как проникновению патогена в организм, так и его распространению по организму. Среди основных анатомо-физиологических барьеров естественной защиты организма при инфекции выделяют: кожу и слизистые оболочки (наружный барьер), нормальную микрофлору; лимфатические узлы, клетки ретикулоэндотелиальной системы, воспаление; кровь — клеточные и гуморальные факторы; гематоэнцефалический барьер. (Подробно этот раздел изложен в материалах диска.)

*Кожа* не только является механическим барьером для патогена, но и обладает бактерицидным свойством за счет секретов сальных и потовых желез. Чистота кожи повышает ее бактерицидность. Известен показатель бактерицидной активности кожи, который определяется по отношению к индикаторным тест-штаммам *E. coli*. Этот показатель входит в число стандартных тестов оценки резистентности организма космонавтов перед полетом в космос. Повреждение кожи является условием для развития раневых инфекций: газовой гангрены, столбняка, бешенства.

*Слизистые оболочки* обеспечивают защиту не только как механический барьер за счет слизи, целостности эпителиального покрова, функции ворсинок. Эпителиоциты слизистых оболочек и железы разных биотопов выделяют на поверхность бактерицидные секреты: слюну, слезную жидкость, желудочный сок, сок тонкой кишки, вагинальный секрет, лизоцим и т.д. При нарушении барьерной функции слизистые оболочки становятся входными воротами инфекции для многих патогенов: возбудителей кишечных инфекций и инфекций дыхательных путей, возбудителей заболеваний, передающихся половым путем и др.

Важная роль в защите биотопов организма от патогена отводится *нормальной* (резидентной или индигенной) *микрофлоре*. Основными представителями нормальной микрофлоры толстой кишки являются кишечная палочка и бифидобактерии, в носоглотке — коринеформные бактерии и непатогенные нейссерии, на коже — эпидермальные стафилококки.

Микрофлора слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта у детей существенно отличается от таковой у взрослых и меняется в зависимости от возраста ребенка, условий его существования, характера питания и т.д. Так, у детей до прорезывания зубов в микрофлоре рта преобладают аэробные бактерии. После прорезывания зубов микрофлора рта ребенка аналогична микрофлоре взрослых, что связано и с изменением характера питания.

Огромное количество микроорганизмов содержится в полости кишечника. Исследование кищечной флоры у детей показало, что микробы в мекониуме появляются со второй половины первых суток жизни. Вначале появляются кокки, затем в кишечнике определяются грамположительные палочки со спорами. В небольшом количестве в мекониуме обнаруживаются также кишечные палочки, вульгарный протей. С 3-го дня, когда появляются бифидобактерии, споровые палочки исчезают.

Основой кишечной микрофлоры у детей, находящихся на грудном вскармливании, являются бифидобактерии, которые составляют около 90% всех микробов кишечника. Встречаются кишечные палочки, энтерококки, ацидофильная палочка и аэрогенные бактерии. У детей, находящихся на искусственном вскармливании, превалируют кишечные палочки, а количество бифидобактерий снижается. Защитная роль нормальной микрофлоры состоит в выделении антагонистически активных веществ (антибиотиков,

бактериоцинов, микроцинов), подавляющих патоген, его способности колонизировать кожу, слизистые оболочки. Нормальная микрофлора образует пленку в биотопе. Кроме защитного антагонизма, известны детоксицирующая, иммуностимулирующая и витаминообразующая функции нормальной микрофлоры, ее участие в пищеварении. Подавление нормальной микрофлоры вследствие заболевания или широкого применения антибиотиков приводит к формированию дисбактериоза, который может стать причиной развития различных форм патологии, в том числе и микробного генеза. Для профилактики и лечения дисбактериоза используются эубиотики — препараты, содержащие живые антагонистически активные штаммы, — представители нормальной микрофлоры организма (колибактерин, бифидумбактерин, лактобактерин).

Второй защитный барьер организма включает *функцию лимфатических узлов, клеток ретикулоэндотелиальной системы*, развитие *воспаления*. Лимфатические узлы выполняют барьерфиксирующую функцию, могут длительно задерживать патоген, не допуская его проникновение в кровь, например фиксация гемолитического стрептококка в лимфоидной ткани миндалин, задержка бруцелл, возбудителя чумы, стафилококка, туберкулезных палочек в регионарных лимфатических узлах. За счет лимфатических узлов предотвращается развитие генерализованной формы инфекции. При подавлении барьерной функции лимфатических узлов могут развиться бактериемия (брюшной тиф, бруцеллез) и сепсис (чума, стафилококковая и стрептококковая инфекции).

Печень, селезенка, эндотелий кровеносных сосудов за счет клеток ретикулоэндотелиальной системы являются своеобразными фильтрами, в которых застревают патогены и таким образом не допускается генерализация инфекции (брюшной тиф). Воспаление в своей основе является защитной реакцией организма, так как в результате воспалительной реакции вокруг патогена концентрируются специализированные клетки, которые должны либо уничтожить возбудителя, либо ограничить его распространение, например при гнойном мастите стафилококковой этиологии в ткани молочной железы образуется локальный гнойный очаг (абсцесс), предотвращающий генерализацию стафилококковой инфекции.

Одним из методов лечения хронических инфекций является назначение препаратов, усиливающих воспалительную реакцию организма как защитную (хроническая гонорея, хроническая дизен-

терия). Но иногда воспаление может выполнять противоположную патогенетическую функцию, т.е. способствовать развитию патологического процесса, нарушению структуры и функции органа (ткани): воспаление легких (пневмония), воспаление почек (нефрит). В таком случае назначают противовоспалительную терапию.

Третья достаточно мощная преграда на пути распространения патогена по организму — это кровь. *Бактерицидная активность крови*, т.е. ее способность к самоочищению, обеспечивается комплексом гуморальных и клеточных факторов естественной резистентности организма. Если кровь перестает выполнять свою бактерицидную функцию, то возбудитель беспрепятственно пребывает и размножается в крови, а через кровь проникает и локализуется в разных органах и тканях. В таких случаях развиваются тяжелые, генерализованные формы инфекции, сепсис и септикопиемия, которые создают реальную угрозу жизни организма-хозяина (чумной сепсис, сибиреязвенный сепсис, стафилококковая септикопиемия).

Четвертый барьер организма — *гематоэнцефалический*, который защищает ткань мозга (головного, спинного) от поражения патогеном. В защитные структуры гематоэнцефалического барьера входят оболочки мозга, стенки кровеносных сосудов, питающих мозговую ткань. Проникновение возбудителя в мозговую ткань приводит к развитию менингоэнцефалитов (менингококк, риккетсии Провачека, вирусы бешенства и энцефалитов). Ткани головного мозга защищены нейросекретируемыми гормонами задней доли гипофиза — окситоцином и вазопрессином, которые наряду с антимикробной активностью подавляют и персистентный потенциал многих патогенов, что используется в клинической практике для борьбы с инфекцией.

### 8.4.2. Факторы естественной резистентности организма

Раздел изложен в материалах диска.

## 8.5. Роль внешней среды в инфекционном процессе

*Внешняя среда* является обязательным участником в инфекционном процессе, его третьей движущей силой. Факторы внешней среды (физические, химические, биологические и социальные)

могут существенно влиять на развитие, течение и исход инфекционного процесса.

Важным физическим фактором является *температура*. Классические опыты Уолкера и Боринга на модели экспериментальной вирусной инфекции показали, что повышение температуры тела организма приводит к активации факторов естественной резистентности, в частности усилению продукции интерферона. При высокой температуре усиливаются механизмы противовирусной защиты. Поэтому при лечении больных вирусными инфекциями не оправдано снижение высокой температуры, если нет для этого жизненно важных показаний. С другой стороны, снижение в холодное время года температуры тела человека (простудный фактор) приводит к ослаблению естественной резистентности. В связи с действием разных температур существует сезонность ряда инфекционных заболеваний. Повышение заболеваемости воздушно-капельными инфекциями (острой респираторной вирусной инфекции — ОРВИ, грипп) имеет место в холодное время года (зимой) под действием простудного фактора, кишечными инфекциями — в летне-осенний период, когда в условиях высокой температуры возбудители кишечных инфекций (дизентерия, холера, гепатит А, брюшной тиф) интенсивно размножаются во внешней среде, а также распространяются с пищевыми продуктами и водой.

Особенности *питания*, наличие витаминов в пище могут существенно влиять на естественную резистентность. В весенний период в связи с авитаминозом обостряются хронические инфекционные заболевания (туберкулез, ревматизм и др.). Витамин $B_{12}$ и другие производные бензимидазола (дибазол), являясь стимуляторами синтеза белка в организме, повышают его естественную резистентность. Поэтому эти препараты используют для профилактики инфекционных болезней.

Солнце управляет жизненными процессами на нашей планете. Выявлена зависимость между активностью Солнца, его геомагнитной активностью, инфекционной заболеваемостью и смертностью среди людей. Выявлена цикличность патологических процессов и показателей естественной резистентности. Установлена связь между активностью Солнца и экспрессией факторов вирулентности микроорганизмов.

*Социальный* фактор является мощным фактором внешней среды, влияющим на устойчивость организма к инфекции. Антибиотико-

терапия, вакцинопрофилактика позволяют достаточно эффективно управлять инфекционным процессом. Благодаря глобальным противоэпидемическим мероприятиям человечество избавилось от натуральной оспы, успешно ведет борьбу с полиомиелитом. Но есть болезни, созданные человеком (*men made diseases*): туберкулез, вирусные гепатиты, ВИЧ-инфекция, болезни, передающиеся половым путем.

Социальные болезни — следствие пороков человеческого общества: наркомании, проституции и т.п. Техногенное загрязнение внешней среды способствует развитию инфекционных заболеваний. Высокое содержание в воздухе, воде солей тяжелых металлов, сероводородсодержащих соединений, радиоактивных элементов приводит к формированию иммунодефицитов в организме, а с другой стороны, в ряде случаев стимулируют экспрессию факторов вирулентности патогена. Так, природный сероводородсодержащий газ Оренбургского, Астраханского, Карачаганакского природных месторождений резко усиливал персистентный потенциал стафилококков, делая население этих газоносных провинций заложниками формирования резидентного стафилококкового бактерионосительства.

Таким образом, формы, течение и исход инфекционного процесса зависят как от вирулентности штамма патогенного микроорганизма, так и от состояния естественной резистентности и иммунитета организма хозяина, где регулирующую функцию выполняют факторы внешней среды.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Назовите форму инфекционного процесса, при которой возбудитель длительное время находится в организме, не проявляя патогенных свойств и не выделяясь в окружающую среду:

1. Бактерионосительство.
2. Латентная инфекция.
3. Медленная инфекция.
4. Острая инфекция.

**Б.** Назовите факторы, способствующие колонизации бактерий в макроорганизме:

1. Бактериоцины.
2. Адгезины.
3. Эндотоксин.
4. IgA-протеаза.

В. Назовите факторы, способствующие инвазии бактерий:
   1. Гиалуронидаза.
   2. Эффекторные белки секреторной системы III типа.
   3. Эндотоксин.
   4. Пили.

Г. В защите от фагоцитоза, помимо поверхностных структур бактериальной клетки, участвуют секретируемые этой клеткой вещества. Отметьте ферменты, принимающие участие в подавлении фагоцитоза бактерий:
   1. Внеклеточная аденилатциклаза.
   2. IgA-протеаза.
   3. Каталаза.
   4. Супероксиддисмутаза.

Д. Отметьте положения, характерные для экзотоксина:
   1. Является слабым антигеном.
   2. Обладает специфичностью действия.
   3. Термостабилен.
   4. Стимулирует образование в организме нейтрализующих антител.

Е. У пациента, болеющего гриппом, развилась пневмония, вызванная *S. pneumoniae.* Назовите форму инфекционного процесса, к которой относится вызванная *S. pneumoniae* пневмония.

Ж. Одним из методов лабораторной диагностики инфекционных болезней является метод гемокультуры, при котором возбудителя выделяют из крови больного. Назовите состояния инфекционного процесса, при которых возбудитель можно выделить из крови.

ЧАСТЬ II

# ОБЩАЯ ИММУНОЛОГИЯ

# Глава 9

# УЧЕНИЕ ОБ ИММУНИТЕТЕ И ФАКТОРЫ ВРОЖДЕННОГО ИММУНИТЕТА

## 9.1. Введение в иммунологию

### 9.1.1. Основные этапы развития иммунологии

Каждый человек на планете (кроме однояйцовых близнецов) имеет присущие только ему генетически детерминированные особенности биополимеров, из которых построено его тело. Однако его организм живет и развивается в непосредственном контакте с представителями живой и неживой природы и разнообразными биоорганическими молекулами естественного или искусственного происхождения, обладающими биологической активностью. Попадая в организм человека, продукты жизнедеятельности и ткани других людей, животных, растений, микробов, а также чужеродные молекулы могут вмешиваться и нарушать биологические процессы, создавая угрозу жизни отдельному индивидууму. От*личительной чертой этих агентов является генетическая чужеродность*. Зачастую подобные продукты образуются внутри организма человека в результате синтетической активности населяющей нас микрофлоры, клеточных мутаций и всевозможных модификаций макромолекул, из которых мы построены.

Для защиты от нежелательной и губительной интервенции эволюция создала у представителей живой природы специальную систему противодействия, совокупный эффект которой был обозначен как *иммунитет* (от лат. *immunitas* — освобождение от чего-либо, неприкосновенность). Применялся этот термин уже в средние века для обозначения, например, освобождения от уплаты от податей, а позже — неприкосновенности дипломатической миссии. Смысл этого термина точно соответствует тем биологическим задачам, которые определила эволюция в отношении иммунитета.

Основными являются распознавание генетического отличия интервента от собственных структур и устранение его влияния на биологические процессы, протекающие в организме, при помощи комплекса специальных реакций и механизмов. Конечной целью деятельности системы иммунной защиты являются сохранение гомеостаза, структурной и функциональной целостности и генетической индивидуальности как отдельного организма, так и вида в целом, а также выработка средств профилактики подобных интервенций в будущем.

Следовательно, иммунитет — это способ защиты организма от генетически чужеродных веществ экзогенного и эндогенного происхождения, направленный на поддержание и сохранение гомеостаза, структурной и функциональной целостности организма и генетической индивидуальности каждого организма и вида в целом.

Иммунитет как общебиологическое и общемединское явление, его анатомические структуры, механизмы функционирования в организме изучает специальная наука — иммунология. Эта наука возникла более 100 лет назад. По мере прогресса человеческих знаний менялись взгляды на иммунитет, на его роль в организме, на механизмы иммунных реакций, расширялась сфера практического использования достижений иммунологии, а в соответствии с этим менялось само определение иммунологии как науки. Зачастую иммунологию трактуют как науку, которая изучает специфическую невосприимчивость к возбудителям инфекционных болезней и разрабатывает способы защиты от них. Это однобокий взгляд, который не дает всестороннего, всеобъемлющего понимания науки, исходя из сущности и механизмов иммунитета и его роли в жизнедеятельности организма. На современном этапе развития учения об иммунитете иммунологию можно определить как общебиологическую и общемедицинскую науку, которая изучает способы и механизмы защиты организма от генетически чужеродных веществ экзогенного и эндогенного происхождения с целью поддержания гомеостаза, структурной и функциональной целостности организма и генетической индивидуальности отдельного индивидуума и вида в целом. Такое определение подчеркивает, что иммунология как наука едина независимо от объекта изучения: человека, животных или растений. Конечно, анатомо-физиологическая основа, набор механизмов и реакций, а также способов защиты от антигенов у представителей животного

и растительного мира будут варьировать, однако принципиальная сущность иммунитета от этого меняться не будет. В иммунологии выделяют три направления: медицинскую иммунологию (гомоиммунологию), зооиммунологию и фитоиммунологию, изучающие соответственно иммунитет у человека, животных и растений, а в каждом из них — общую и частную. Одним из важнейших ее разделов является медицинская иммунология. Сегодня медицинская иммунология решает такие важные проблемы, как диагностика, профилактика и лечение инфекционных болезней (иммунопрофилактика или вакцинология), аллергических состояний (аллергология), злокачественных опухолей (иммуноонкология), болезней, в механизме которых играют роль иммунопатологические процессы (иммунопатология), иммунные взаимоотношения матери и плода на всех стадиях репродукции (иммунология репродукции), изучает иммунные механизмы и вносит практический вклад в решение проблемы трансплантации органов и тканей (трансплантационная иммунология); можно также выделить иммуногематологию, изучающую взаимоотношения донора и реципиента при переливании крови, иммунофармакологию, изучающую влияние на иммунные процессы лекарственных веществ. В последние годы выделились клиническая и экологическая иммунология. Клиническая иммунология изучает и разрабатывает проблемы диагностики и лечения болезней, возникающих в результате врожденных (первичных) и приобретенных (вторичных) иммунодефицитов, а экологическая иммунология — влияние на иммунную систему всевозможных экологических факторов (климатогеографических, социальных, профессиональных и т.д.).

Хронологически иммунология как наука уже прошла два больших периода (Ульянкина Т.И., 1994): период протоиммунологии (от античного периода до 80-х годов XIX века), связанный со стихийным, эмпирическим познанием защитных реакций организма, и период *зарождения экспериментальной и теоретической иммунологии* (с 80-х годов XIX века до второго десятилетия XX века). В течение второго периода завершилось формирование классической иммунологии, которая носила в основном характер инфекционной иммунологии. С середины XX века иммунология вступила в третий, молекулярно-генетический, период, который продолжается до наших дней. Этот период характеризуется быстрыми темпами развития молекулярной и клеточной иммунологии и иммуногенетики.

Предохранение от заболевания натуральной оспой путем прививки человеку коровьей оспы предложил более 200 лет назад английский врач Э. Дженнер, однако это наблюдение носило чисто эмпирический характер. Поэтому основоположниками научной иммунологии по праву считаются французский ученый-химик Л. Пастер, открывший принцип вакцинации, русский ученый-зоолог И.И. Мечников — автор учения о фагоцитозе и немецкий врач-биохимик П. Эрлих, сформулировавший гипотезу об антителах. В 1888 г. за выдающиеся заслуги Л. Пастера перед человечеством на народные пожертвования был учрежден Институт иммунологии (ныне Институт Пастера), который явился школой, вокруг которой группировались иммунологи многих стран. Российские ученые активно участвовали в становлении и развитии иммунологии. Более 25 лет И.И. Мечников был заместителем директора по науке в Институте Пастера, т.е. был его ближайшим помощником и единомышленником. В Пастеровском институте работали многие выдающиеся русские ученые: М. Безредка, Н.Ф. Гамалея, Л.А. Тарасович, Г.Н. Габричевский, И.Г. Савченко, С.В. Коршун, Д.К. Заболотный, В.А. Барыкин, Н.Я. и Ф.Я. Чистовичи и многие другие. Эти ученые продолжали развивать традиции Пастера и Мечникова в иммунологии и по существу создали русскую школу иммунологов.

Российским ученым принадлежат многие выдающиеся открытия в области иммунологии: И.И. Мечников заложил основы учения о фагоцитозе, В.К. Высокович одним из первых сформулировал роль ретикулоэндотелиальной системы в иммунитете, Г.Н. Габричевский описал явление хемотаксиса лейкоцитов, Ф.Я. Чистович стоял у истоков открытия тканевых антигенов, М. Райский установил феномен ревакцинации, т.е. иммунологической памяти, М. Сахаров — один из основоположников учения об анафилаксии, акад. Л.А. Зильбер стоял у истоков учения об антигенах опухолей, акад. П.Ф. Здродовский обосновал физиологическое направление в иммунологии, акад. Р.В. Петров внес весомый вклад в развитие неинфекционной иммунологии.

Российские ученые по праву являются лидерами в разработке фундаментальных и прикладных проблем вакцинологии и иммунопрофилактики в целом. Хорошо известны в нашей стране и за рубежом имена создателей вакцин против туляремии (Б.Я. Эльберт и Н.А. Гайский), сибирской язвы (Н.Н. Гинзбург), полиомие-

лита (М.П. Чумаков, А.А. Смородинцев), кори, паротита, гриппа (А.А. Смородинцев), Ку-лихорадки и сыпного тифа (П.Ф. Здродовский), полианатоксинов против раневых инфекций и ботулизма (А.А. Воробьев, Г.В. Выгодчиков, П.Н. Бургасов) и др. Активное участие российские ученые принимали в разработке вакцин и других иммунобиологических препаратов, стратегии и тактики иммунопрофилактики, глобальной ликвидации и снижении уровня инфекционных болезней. В частности, по их инициативе и с их помощью ликвидирована натуральная оспа на земном шаре (В.М. Жданов, О.Г. Анджапаридзе), успешно ликвидируется полиомиелит (М.П. Чумаков, С.Г. Дроздов).

Иммунология за сравнительно короткий исторический период добилась существенных результатов в снижении и ликвидации болезней человека, сохранении и поддержании здоровья людей нашей планеты.

### 9.1.2. Виды иммунитета

Способность к распознаванию чужеродных структур и защите собственного организма от интервентов сформировалась довольно рано. Элементарные системы защиты от любых чужеродных веществ имеют уже низшие организмы, в частности беспозвоночные (губки, кишечнополостные, черви). Организм человека, как и всех теплокровных животных, уже имеет сложноорганизованную систему противодействия генетически чужеродным агентам. Однако анатомическое строение, физиологические функции и реакции, обеспечивающие такую защиту у отдельных видов животных, у человека и низших организмов в соответствии с уровнем эволюционного развития существенно различаются.

Так, фагоцитоз и аллогенная ингибиция как одни из ранних филогенетических защитных реакций присуща всем многоклеточным организмам; дифференцированные лейкоцитоподобные клетки, выполняющие функции клеточного иммунитета, появляются уже у кишечнополостных и моллюсков; у круглоротых (миноги) возникают зачатки тимуса, Т-лимфоциты, иммуноглобулины, отмечается иммунная память; у рыб уже есть типичные для высших животных лимфоидные органы — тимус и селезенка, плазматические клетки и антитела класса М; птицы обладают центральным органом иммунитета в виде сумки Фабрициуса, у них появляется способность реагировать в виде гиперчувствительности немедлен-

ного типа. Наконец, у млекопитающих иммунная система достигает наиболее высокого уровня развития: формируются Т-, В- и А-системы иммунных клеток, осуществляется их кооперативное взаимодействие, появляется способность синтеза иммуноглобулинов разных классов и формы иммунного реагирования.

В зависимости от уровня эволюционного развития, особенностей и сложности сформировавшейся иммунной системы, способностей последней отвечать теми или иными реакциями на антигены в иммунологии принято выделять отдельные виды иммунитета.

Так, введено понятие о врожденном и приобретенном иммунитете (рис. 9.1). Врожденный, или видовой, иммунитет, он же наследственный, генетический, конституциональный — это выработанная в процессе филогенеза генетически закрепленная, передающаяся по наследству невосприимчивость особей данного вида к какому-либо чужеродному агенту. Примером может служить невосприимчивость человека к некоторым возбудителям, в том числе к особо опасным для сельскохозяйственных животных (чума крупного рогатого скота, болезнь Ньюкасла, поражающая птиц, оспа лошадей и др.), нечувствительность человека к бактериофагам, поражающим клетки бактерий. Объяснить видовой иммунитет можно с разных позиций: неспособностью чужеродного агента к адгезии на клетках и молекулах-мишенях, определяющих запуск патологического процесса и активацию иммунной системы, его быстрой деструкцией ферментами макроорганизма, отсутствием условий для колонизации макроорганизма.

Видовой иммунитет может быть *абсолютным* и *относительным*. Например, нечувствительные к столбнячному токсину лягушки реагируют на его введение при повышении температуры их тела. Лабораторные животные, нечувствительные к какому-либо чужеродному агенту, реагируют на него на фоне введения иммунодепрессантов или удаления центрального органа иммунитета — тимуса.

Приобретенный иммунитет — это невосприимчивость к чужеродному агенту чувствительного к нему организма человека, животных, приобретаемая в процессе индивидуального развития, т.е. развития каждой особи в отдельности. Основой ее является потенция к иммунной защите, которая реализуется лишь при необходимости и в определенных условиях. Приобретенный иммунитет, точнее его конечный результат, сам по себе не наследуется (в отличие, конечно, от потенции), это индивидуальный прижизненный опыт.

| ИММУНИТЕТ | |
|---|---|
| Видовой (врожденный, наследственный, генетический, конституционный) | Приобретенный |

| ИММУНИТЕТ | |
|---|---|
| Активный (естественный, искусственный) | Пассивный (естественный, искусственный) |

| ИММУНИТЕТ | |
|---|---|
| Гуморальный | Клеточный |

| ИММУНИТЕТ | |
|---|---|
| Местный | Общий |

| ИММУНИТЕТ | |
|---|---|
| Стерильный | Нестерильный |

| ИММУНИТЕТ |
|---|
| • Антитоксический<br>• Противобактериальный<br>• Противовирусный<br>• Противогрибковый<br>• Противоопухолевый<br>• Трансплантационный<br>• Противогельминтный<br>• Противопротозойный |

**Рис. 9.1.** Классификация видов иммунитета

Различают *естественный* и *искусственный* приобретенный иммунитет. Примером естественного приобретенного иммунитета у человека может служить невосприимчивость к инфекции, возникающая после перенесенного инфекционного заболевания (так называемый постинфекционный иммунитет), например после скарлатины. Искусственный приобретенный иммунитет создается преднамеренно для формирования невосприимчивости организма

к определенному агенту путем введения специальных иммунобиологических препаратов, например вакцин, иммунных сывороток, иммунокомпетентных клеток (см. главу 14).

Приобретенный иммунитет может быть *активным* и *пассивным*. *Активный иммунитет* обусловлен непосредственным вовлечением системы иммунитета в процесс его формирования (например, поствакцинальный, постинфекционный иммунитет). *Пассивный иммунитет* образуется за счет введения в организм уже готовых иммунореагентов, способных обеспечить необходимую защиту. К таким препаратам относятся антитела (препараты иммуноглобулинов и иммунные сыворотки) и лимфоциты. Пассивный иммунитет формируется у плода в эмбриональном периоде за счет проникновения материнских антител через плаценту, а в период грудного вскармливания — при поглощении ребенком антител, содержащихся в молоке.

Поскольку в формировании иммунитета принимают участие клетки иммунной системы и гуморальные факторы, принято активный иммунитет дифференцировать в зависимости от того, какой из компонентов иммунных реакций играет ведущую роль в формировании защиты от антигена. В связи с этим различают *гуморальный*, *клеточный* иммунитет. Примером клеточного иммунитета может служить трансплантационный иммунитет, когда ведущую роль в иммунитете играют цитотоксические Т-лимфоциты-киллеры. Иммунитет при токсинемических инфекциях (дифтерия) и интоксикациях (столбняк, ботулизм) обусловлен в основном антителами (антитоксинами).

В зависимости от направленности иммунитета, т.е. природы чужеродного агента, выделяют *антитоксический*, *противовирусный*, *противогрибковый*, *антибактериальный*, *антипротозойный*, *трансплантационный*, *противоопухолевый* и другие виды иммунитета.

Иммунитет может поддерживаться, сохраняться либо в отсутствие или только в присутствии чужеродного агента в организме. В первом случае такой агент играет роль пускового фактора, а иммунитет называют *стерильным*, во втором — *нестерильным*. Примером стерильного иммунитета является поствакцинальный иммунитет при введении убитых вакцин, а нестерильного — иммунитет при туберкулезе, который поддерживается постоянным присутствием в организме микобактерий туберкулеза.

Иммунитет может быть *системным*, т.е. генерализованным, распространяющимся на весь организм, и *местным*, при котором на-

блюдается более выраженная резистентность отдельных органов и тканей. Как правило, учитывая особенности анатомического строения и организации функционирования, понятие «местный иммунитет» используется для обозначения резистентности слизистых оболочек (поэтому его называют иногда мукозальным) и кожных покровов. Такое подразделение также условно, так как в процессе формирования невосприимчивости эти виды иммунитета могут переходить друг в друга.

## 9.2. Врожденный иммунитет

**Врожденный** (видовой, генетический, конституциональный, естественный, неспецифический) **иммунитет** — это выработанная в процессе филогенеза, передающаяся по наследству, присущая всем особям одного вида устойчивость к инфекционным агентам (или антигенам).

Основной особенностью биологических факторов и механизмов, обеспечивающих такую устойчивость, является наличие в организме готовых (преформированных) эффекторов, которые способны обеспечить деструкцию патогена быстро, без длительных подготовительных реакций. Они составляют первую линию защиты организма от внешней микробной или антигенной агрессии.

### 9.2.1. Факторы врожденного иммунитета

Если рассматривать траекторию движения патогенного микроба в динамике инфекционного процесса, то легко заметить, что организм на этом пути выстраивает различные линии защиты (табл. 9.1). Прежде всего это покровный эпителий кожи и слизистых оболочек, обладающий колонизационной резистентностью. Если возбудитель вооружен соответствующими инвазивными факторами, то он проникает в субэпителиальную ткань, где развивается острая воспалительная реакция, ограничивающая возбудителя во входных воротах. Следующая станция на пути патогена — регионарные лимфатические узлы, куда он транспортируется лимфой по лимфатическим сосудам, дренирующим соединительную ткань. Лимфатические сосуды и узлы отвечают на внедрение развитием лимфангита и лимфаденита. После преодоления этого барьера микробы по эфферентным лимфатическим сосудам проникают в кровь — в ответ может развиться системный воспалительный от-

вет. Если микроб не гибнет в крови, то он гематогенно разносится во внутренние органы — развиваются генерализованные формы *инфекции*.

**Таблица 9.1.** Факторы и механизмы антиинфекционного иммунитета (принцип эшелонированности антимикробной защиты по Маянскому А.Н., 2003)

| Уровень действия | Механизмы |
|---|---|
| Эпителиальные покровы: | |
| кожа | Механический барьер<br>Механическое самоочищение: шелушение<br>Химическое самоочищение: жирные кислоты (секрет сальных желез), молочная кислота, пот (NaCl), катионные пептиды<br>Нормальная микрофлора |
| слизистые оболочки | Механическое самоочищение: вымывание, мукоцилиарный транспорт, перистальтика, чиханье, кашель, отслойка поверхностных пластов эпителия<br>Антиадгезивные факторы: муцин и другие продукты секретов, секреторный IgA<br>Макрофаги, встроенные в эпителий (респираторный тракт), нейтрофилы, мигрирующие в слизистый биослой и подвергающиеся дегрануляции (респираторный тракт, влагалище и шейка матки) |
| субэпителиальная ткань | Резидентные факторы: клетки (нейтрофилы, макрофаги, тучные клетки, эозинфилы, естественные киллеры, лимфоциты; тканевая жидкость (см. факторы плазмы)<br>Мобилизуемые факторы: воспалительная реакция, иммунный ответ |
| Барьер лимфатических узлов | Резидентные факторы: макрофаги, дендритные клетки лимфатических узлов, гуморальные факторы<br>Мобилизуемые факторы: воспалительная реакция, иммунный ответ |
| Кровь | Резидентные факторы: моноциты, нейтрофилы, макрофаги и дендритные клетки на пути тока крови<br>Гуморальные факторы: рецепторы к *pattern*-структурам микроорганизмов (коллектины, пентраксины, острофазовые белки), комплемент, лизоцим, липидные медиаторы, цитокины<br>Мобилизуемые факторы: системная воспалительная реакция, иммунный ответ |
| Внутренние органы | см. Субэпителиальная ткань |

К факторам врожденного иммунитета относят:

- кожу и слизистые оболочки;
- клеточные факторы: нейтрофилы, макрофаги, дендритные клетки, эозинофилы, базофилы, естественные киллеры;
- гуморальные факторы: система комплемента, растворимые рецепторы к поверхностным структурам микроорганизмов (*pattern*-структуры), антимикробные пептиды, интерфероны.

**Кожа и слизистые оболочки**. Тонкий слой эпителиальных клеток, выстилающий поверхность кожи и слизистых оболочек, является тем барьером, который практически непроницаем для микроорганизмов. Он отделяет стерильные ткани организма от заселенного микробами внешнего мира.

*Кожа* покрыта многослойным плоским эпителием, в котором различают два слоя: роговой и базальный.

Кератиноциты рогового слоя — это погибшие клетки, устойчивые к агрессивным химическим соединениям. На их поверхности отсутствуют рецепторы для адгезивных молекул микроорганизмов, поэтому они обладают значительной устойчивостью к колонизации и являются самым надежным барьером на пути большинства бактерий, грибов, вирусов, простейших. Исключение составляют *S. aureus*, *Pr. acnae*, *I. pestis*, да и они скорее всего проникают либо через микротрещины, либо с помощью кровососущих насекомых, либо через устья потовых и сальных желез. Устье сальных и потовых желез, волосяных фоликулов в коже наиболее уязвимы, поскольку здесь слой ороговевшего эпителия истончается. В защите этих участков важную роль играют продукты потовых и сальных желез, содержащих молочную, жирные кислоты, ферменты, антибактериальные пептиды, оказывающие антимикробное действие. Именно в устьях придатков кожи располагается глубокая резидентная микрофлора, образующая микроколонии и продуцирующая защитные факторы (см. главу 4).

В эпидермисе, помимо кератиноцитов, содержатся еще два типа клеток — клетки Лангерганса и клетки Гринстейна (отростчатые эпидермоциты, составляющие 1–3% кариоцитов базального слоя). Клетки Лангерганса и Гринстейна имеют миелоидное происхождение и относятся к дендритным. Предполагается, что по функции эти клетки являются оппозитными. Клетки Лангерганса участвуют в презентации антигена, индуцируют иммунный ответ, а клетки Гринстейна продуцируют цитокины, подавляющие им-

мунные реакции в коже. Типичные кератиноциты и дендритные клетки эпидермиса в совокупности с лимфоидными структурами дермы принимают активное участие в реакциях приобретенного иммунитета (см. ниже).

Здоровая кожа обладает высокой способностью к самоочищению. Это легко доказать, если нанести на ее поверхность нетипичные для кожи бактерии — через некоторое время такие микробы исчезают. На этом принципе основаны методы оценки бактерицидной функции кожи.

*Слизистые оболочки.* Большинство инфекций начинается не с кожи, а со слизистых оболочек. Это связано, во-первых, с большей площадью их поверхности (слизистые оболочки около 400 $м^2$, кожа около 2 $м^2$), во-вторых, с меньшей защищенностью.

Слизистые оболочки не имеют многослойного плоского эпителия. На их поверхности располагается лишь один слой эпителиоцитов. В кишечнике это однослойный цилиндрический эпителий, бокаловидные секреторные клетки и М-клетки (мембранные эпителиальные клетки), располагающиеся в слое эпителиоцитов, покрывающие лимфоидные скопления. М-клетки наиболее уязвимы для проникновения многих патогенных микроорганизмов из-за целого ряда особенностей: наличия специфических рецепторов для некоторых микроорганизмов (сальмонелл, шигелл, патогенных эшерихий и др.), которые не обнаружены на соседних энтероцитах; истонченного слизистого слоя; способности к эндоцитозу и пиноцитозу, благодаря чему обеспечивается облегченный транспорт антигенов и микроорганизмов из кишечной трубки в мукозоассоциированную лимфоидную ткань (см. главу 12); отсутствия мощного лизосомального аппарата, характерного для макрофагов и нейтрофилов, благодаря чему бактерии и вирусы перемещаются в субэпителиальное пространство без разрушения.

М-клетки относятся к эволюционно сформировавшейся системе облегченного транспорта антигенов к иммунокомпетентным клеткам, а бактерии и вирусы используют этот путь для своей транслокации через эпителиальный барьер.

Аналогичные М-клеткам кишечника эпителиоциты, ассоциированные с лимфоидной тканью, имеются у слизистых оболочек бронхоальвеолярного дерева, носоглотки, половой системы.

**Колонизационная резистентность покровного эпителия**. Любой инфекционный процесс начинается с адгезии возбудителя на по-

верхности чувствительных эпителиоцитов (за исключением микроорганизмов, передающихся через укусы насекомых или вертикально, т.е. от матери к плоду). Только закрепившись, микробы приобретают возможность размножиться во входных воротах и образовывать колонию. В колонии накапливаются токсины, ферменты патогенности в количестве, необходимом для преодоления эпителиального барьера. Этот процесс называется колонизацией. Под колонизационной резистентностью понимают устойчивость эпителия кожи и слизистых оболочек к заселению посторонними микроорганизмами. Колонизационную резистентность слизистых оболочек обеспечивает муцин, секретируемый бокаловидными клетками и образующий на поверхности сложноорганизованную биопленку. В этот биослой встроены все защитные инструменты: резидентная микрофлора, бактерицидные вещества (лизоцим, лактоферрин, токсичные метаболиты кислорода, азота и т.д.), секреторные иммуноглобулины, фагоциты.

*Роль нормальной микрофлоры* (см. главу 4.3). Важнейшим механизмом участия резидентной микрофлоры в колонизационной резистентности является их способность продуцировать бактериоцины (антибиотикоподобные субстанции), короткоцепочечные жирные кислоты, молочную кислоту, сероводород, перекись водорода. Такими свойствами обладают лакто-, бифидобактерии, бактероиды.

Благодаря ферментативной активности анаэробных бактерий в кишечнике происходит деконъюгация желчных кислот с образованием дезоксихолиевой кислоты, токсичной для патогенных и условно-патогенных бактерий.

*Муцин* наряду с полисахаридами, продуцируемыми резидентными бактериями (в частности, лактобактериями), образует на поверхности слизистых оболочек выраженный гликоналикс (биопленку), который эффективно экранирует сайты адгезии и делает их недоступными для случайных бактерий. Бокаловидные клетки образуют смесь сиало- и сульфомуцинов, соотношение которых различается в различных биотонах. Своеобразие состава микрофлоры в различных экологических нишах в значительной степени определяется количеством и качеством муцина.

*Фагоцитирующие клетки и продукты их дегрануляции.* В слизистый биослой на поверхности эпителия мигрируют макрофаги и нейтрофилы. Наряду с фагоцитозом эти клетки выделяют биоцид-

ные продукты наружу, содержащиеся в их лизосомах (лизоцим, пероксидаза, лактоферрин, дефанзины, токсичные метаболиты кислорода, азота), которые повышают антимикробные свойства секретов.

*Химические и механические факторы.* В резистентности покровного эпителия слизистых оболочек важную роль играют секреты, обладающие выраженными биоцидными, антиадгезивными свойствами: слеза, слюна, желудочный сок, ферменты и желчные кислоты тонкой кишки, цервикальный и вагинальный секреты репродуктивной системы женщин.

Благодаря целенаправленным движениям — перистальтике гладкой мускулатуры в кишечнике, ресничек мерцательного эпителия в респираторном тракте, мочи в мочевыводящей системе — образующиеся секреты вместе с содержащимися в них микроорганизмами перемещаются в направлении выхода и выводятся наружу.

Колонизационная резистентность слизистых оболочек усиливается за счет секреторных иммуноглобулинов А, синтезируемых мукозоассоциированной лимфоидной тканью.

Покровный эпителий мукозального тракта постоянно регенерирует за счет стволовых клеток, расположенных в толще слизистых оболочек. В кишечнике эту функцию выполняют клетки крипт, в которых наряду со стволовыми располагаются клетки Панета — особые клетки, синтезирующие антибактериальные белки (лизоцим, катионные пептиды). Эти белки защищают не только стволовые клетки, но и покровные эпителиоциты. При воспалении в стенке слизистой оболочки продукция этих белков усиливается.

Колонизационная резистентность покровного эпителия обеспечивается всей совокупностью защитных механизмов врожденного и приобретенного (секреторные иммуноглобулины) иммунитета и является основой устойчивости организма к большинству микроорганизмов, обитающих во внешней среде. Отсутствие на эпителиоцитах специфических рецепторов для определенных микроорганизмов, по-видимому, является базовым механизмом генетической резистентности животных одного вида к микробам, патогенным для животных другого вида.

### 9.2.2. Клеточные факторы

**Нейтрофилы и макрофаги**. Способностью к эндоцитозу (поглощению частиц с образованием внутриклеточной вакуоли) обла-

дают все эукариотические клетки. Именно таким образом внутрь клеток проникают многие патогенные микроорганизмы. Однако в большинстве инфицированных клеток отсутствуют механизмы (либо они слабы), обеспечивающие деструкцию патогена. В процессе эволюции в организме многоклеточных сформировались специализированные клетки, имеющие мощные системы внутриклеточного киллинга, основной «профессией» которых является фагоцитоз (от греч. *phagos* — пожираю, *cytos* — клетка) — поглощение частиц диаметром не менее 0,1 мкм (в отличие от пиноцитоза — поглощения частиц меньшего диаметра и макромолекул) и уничтожение захваченных микробов. Такими свойствами обладают полиморфно-ядерные лейкоциты (в основном нейтрофилы) и мононуклеарные фагоциты (эти клетки иногда называют профессиональными фагоцитами).

Впервые идея о защитной роли подвижных клеток (микро- и макрофагов) была сформулирована в 1883 г. И.И. Мечниковым, который за создание клеточно-гуморальной теории иммунитета (в соавторстве с П. Эрлихом) был удостоен в 1909 г. Нобелевской премии.

Нейтрофилы и мононуклеарные фагоциты имеют общее миелоидное происхождение из стволовой кроветворной клетки. Однако эти клетки различаются рядом свойств.

Нейтрофилы — наиболее многочисленная и подвижная популяция фагоцитов, созревание которых начинается и заканчивается в костном мозгу. Около 70% всех нейтрофилов сохраняется в виде резерва в костно-мозговых депо, откуда они под влиянием соответствующих стимулов (провоспалительных цитокинов, продуктов микробного происхождения, C5a-компонента комплемента, колониестимулирующих факторов, кортикостероидов, катехоламинов) могут экстренно перемещаться через кровь в очаг тканевой деструкции и участвовать в развитии острого воспалительного ответа. Нейтрофилы — это «отряд быстрого реагирования» в системе антимикробной защиты.

Нейтрофилы — короткоживущие клетки, продолжительность их жизни около 15 сут. Из костного мозга они выходят в кровоток уже зрелыми клетками, утратившими способность к дифференцированию и пролиферации. Из крови нейтрофилы перемещаются в ткани, в которых они либо гибнут, либо выходят на поверхность слизистых оболочек, где и заканчивают свой жизненный цикл.

Мононуклеарные фагоциты представлены промоноцитами костного мозга, моноцитами крови и тканевыми макрофагами. *Моноциты, в отличие от нейтрофилов, — незрелые клетки, которые,* попадая в кровяное русло и далее в ткани, созревают в тканевые макрофаги (плевральные и перитонеальные, купферовские клетки печени, альвеолярные, интердигитальные клетки лимфатических узлов, костного мозга, остеокласты, микроглиоциты, мезангиальные клетки почек, сертолиевы клетки яичек, клетки Лангерганса и Гринстейна кожи). Продолжительность жизни мононуклеарных фагоцитов от 40 до 60 сут. Макрофаги — не очень быстрые клетки, но они рассеяны во всех тканях, и, в отличие от нейтрофилов, им нет необходимости в столь срочной мобилизации. Если продолжить аналогию с нейтрофилами, то макрофаги в системе врожденного иммунитета — это «войска специального назначения».

Важной особенностью нейтрофилов и макрофагов является наличие в их цитоплазме большого количества лизосом — гранул размером 200–500 нм, содержащих различные ферменты, бактерицидные и биологически активные продукты (лизоцим, миелопероксидаза, дефензины, бактерицидный протеин, лактоферрин, протеиназы, катепсины, коллагеназа и т.д.). Благодаря столь разнообразному «вооружению» фагоциты обладают мощным деструктивным и регуляторным потенциалом.

Нейтрофилы и макрофаги чутко реагируют на любые изменения гомеостаза. Для этой цели они оснащены богатым арсеналом рецепторов, располагающихся на их цитоплазматической мембране (рис. 9.2):

- рецепторы для распознавания чужого — *Toll*-подобные рецепторы (*Toll-like receptor — TLR*), впервые открытые A. Poltorak в 1998 г. у плодовой мушки и впоследствии обнаруженные у нейтрофилов, макрофагов и дендритных клеток. По значимости открытие *Toll*-подобных рецепторов сопоставимо с более ранним обнаружением антигенраспознающих рецепторов у лимфоцитов. *Toll*-подобные рецепторы узнают не антигены, разнообразие которых в природе чрезвычайно велико (около $10^{18}$ вариантов), а более грубые повторяющиеся молекулярные углеводные и липидные узоры — *pattern*-структуры (от англ. *pattern* — узор), которых нет на клетках организма хозяина, но которые присутствуют у простейших, грибов, бактерий, вирусов. Репертуар таких узоров невелик и составляет около 20 ва-

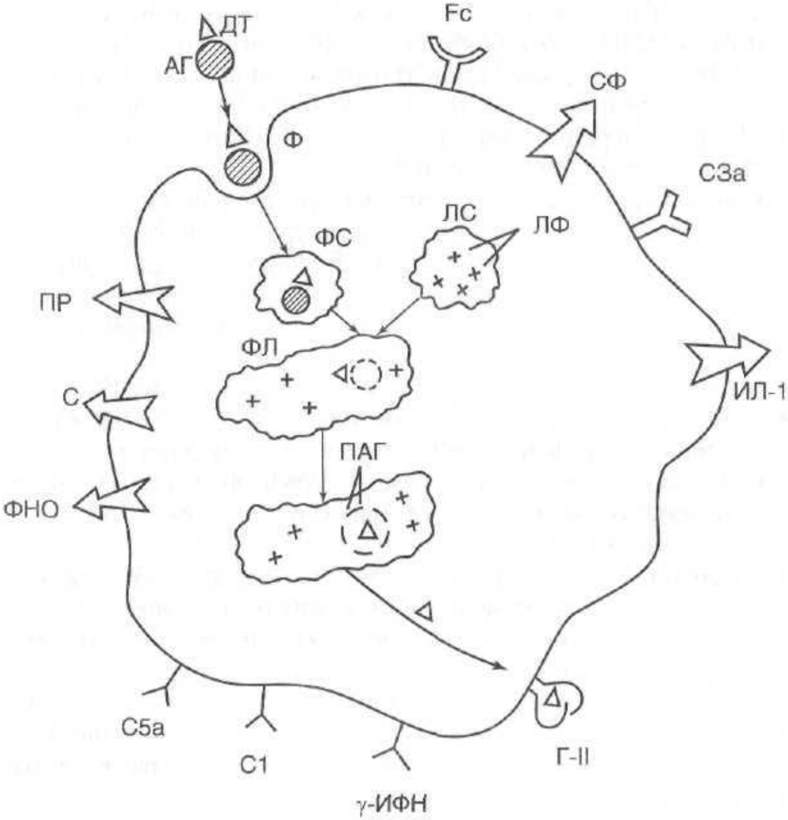



**Рис. 9.2.** Функциональные структуры макрофага (схема): АГ — антиген; ДТ — антигенная детерминанта; ФС — фагосома; ЛС — лизосома; ЛФ — лизосомальные ферменты; ФЛ — фаголизосома; ПАГ — процессированный антиген; Г-II — антиген гистосовместимости II класса (MHC II); Fc — рецептор для Fc-фрагмента молекулы иммуноглобулина; C1, C3a, C5a — рецепторы для компонентов комплемента; γ-ИФН — рецептор для γ-МФН; С — секреция компонентов комплемента; ПР — секреция перекисных радикалов; ИЛД-1 — секреция; ФНО — секреция фактора некроза опухолей; Сф — секреция ферментов

риантов. *Toll*-подобные рецепторы представляют собой семейство мембранных гликопротеидов, известно 11 типов таких рецепторов, способных узнавать всю палитру *pattern*-структур микроорганизмов (липополисахариды, глико-, липопротеи-

ды, нуклеиновые кислоты, белки теплового шока и т.д.). Взаимодействие *Toll*-подобных рецепторов с соответствующими лигандами запускает транскрипцию генов провоспалительных цитокинов и ко-стимулирующих молекул, которые необходимы для миграции, адгезии клеток, фагоцитоза и представления антигенов лимфоцитам;

- маннозно-фукозные рецепторы, распознающие углеводные компоненты поверхностных структур микроорганизмов;
- рецепторы для мусора (*scavenger receptor*) — для связывания фосфолипидных мембран и компонентов собственных разрушенных клеток. Участвуют в фагоцитозе поврежденных и умирающих клеток;
- рецепторы для С3в- и С4в-компонентов комплемента;
- рецепторы для Fc-фрагментов IgG. Эти рецепторы, как и рецепторы для компонентов комплемента, играют важную роль в связывании иммунных комплексов и фагоцитозе бактерии, помеченных иммуноглобулинами и комплементом (эффект опсонизации);
- рецепторы для цитокинов, хемокинов, гормонов, лейкотриенов, простагландинов и т.д. позволяют взаимодействовать с лимфоцитами и реагировать на любые изменения внутренней среды организма.

Основной функцией нейтрофилов и макрофагов является фагоцитоз. Фагоцитоз — это процесс поглощения клеткой частиц или крупных макромолекулярных комплексов. Он складывается из нескольких последовательно протекающих этапов:

- активация и хемотаксис — целенаправленное движение клетки к объекту фагоцитоза в сторону повышающейся концентрации хемоаттрактантов, роль которых играют хемокины, компоненты комплемента и микробной клетки, продукты деградации тканей организма;
- адгезия (прикрепление) частиц к поверхности фагоцита. В адгезии важную роль играют *Toll*-подобные рецепторы, а также рецепторы к Fc-фрагменту иммуноглобулина и С3в-компоненту комплемента (такой фагоцитоз называется иммунным). Иммуноглобулины M, G, С3в-, С4в-компоненты комплемента усиливают адгезию (являются опсонинами), служат мостиком между микробной клеткой и фагоцитом;
- поглощение частиц, их погружение в цитоплазму и образование вакуоли (фагосомы);

• внутриклеточный киллинг (убийство) и переваривание. После поглощения частицы фагосомы сливаются с лизосомами — образуется фаголизосома, в которой бактерии гибнут под действием бактерицидных продуктов гранул (кислороднезависимая система бактерицидности). Одновременно в клетке усиливается потребление кислорода и глюкозы — развивается так называемый респираторный (окислительный) взрыв, что *приводит к образованию токсичных* метаболитов кислорода и азота ($H_2O_2$, супероксиданиона $O_2$, гипохлорной кислоты, пироксинитрита), обладающих высокой бактерицидностью (кислородзависимая система бактерицидности).

Не все микроорганизмы чувствительны к бактерицидным системам фагоцитов. Гонококки, стрептококки, микобактерии и другие выживают после контакта с фагоцитами, такой фагоцитоз называется незавершенным.

Фагоциты, помимо фагоцитоза (эндоцитоза), могут осуществлять свои цитотоксические реакции путем экзоцитоза — выделения своих гранул наружу (дегрануляция) — таким образом фагоциты осуществляют внеклеточный киллинг. Нейтрофилы, в отличие от макрофагов, способны образовывать внеклеточные бактерицидные ловушки — в процессе активации клетка выбрасывает наружу нити ДНК, в которых располагаются гранулы с бактерицидными ферментами. Благодаря липкости ДНК бактерии приклеиваются к ловушкам и под действием фермента погибают.

Нейтрофилы и макрофаги являются важнейшим звеном врожденного иммунитета, однако их роль в защите от различных микробов неодинакова. Нейтрофилы эффективны при инфекциях, вызванных внеклеточными патогенами (гноеродные кокки, энтеробактерии и др.), индуцирующими развитие острого воспалительного ответа. При таких инфекциях эффективна кооперация нейтрофил–комплемент–антитело. Макрофаги защищают от внутриклеточных патогенов (микобактерии, риккетсии, хламидии и др.), вызывающих развитие хронического гранулематозного воспаления, где главную роль играет кооперация макрофаг–Т-лимфоцит.

Помимо участия в антимикробной защите, фагоциты участвуют в удалении из организма отмирающих, старых клеток и продуктов их распада, неорганических частиц (уголь, минеральная пыль и др.). Фагоциты (особенно макрофаги) являются антигенпред-

ставляющими, они обладают секреторной функцией, синтезируют и выделяют наружу широкий спектр биологически активных соединений: цитокины (интерлейкины-1, 6, 8, 12, фактор некроза опухоли), простагландины, лейкотриены, интерфероны $\alpha$ и $\gamma$. Благодаря этим медиаторам фагоциты активно участвуют в поддержании гомеостаза, в процессах воспаления, в адаптивном иммунном ответе, регенерации.

**Эозинофилы** относятся к полиморфно-ядерным лейкоцитам. Они отличаются от нейтрофилов тем, что обладают слабой фагоцитарной активностью. Эозинофилы поглощают некоторые бактерии, но внутриклеточный киллинг у них менее эффективен, чем у нейтрофилов.

Основная функция эозинофилов заключается в защите от крупных паразитов. После активации эти клетки выделяют токсичные продукты своих гранул, оказывающих губительное действие на гельмины. К таким продуктам относят: катионный белок — РНКазу, контакт с которой приводит к образованию мембранных каналов в оболочке паразита; пероксидазу эозинофилов, которая, в отличие от пероксидазы нейтрофилов, окисляя субстраты, приводит к образованию гипогалидов, высокотоксичных для некоторых паразитов; главный основной белок эозинофилов — основной компонент гранул, который способен полимеризоваться в оболочке паразита с образованием трансмембранных пор, через которые внутрь мишени проникают другие медиаторы.

**Естественные киллеры**. Естественные киллеры — большие лимфоцитоподобные клетки, которые происходят из лимфоидных предшественников. Они содержатся в крови, тканях, особенно их много в печени, слизистой оболочке репродуктивной системы женщин, селезенке. Естественные киллеры, как и фагоциты, содержат лизосомы, но фагоцитарной активностью не обладают.

Естественные киллеры распознают и элиминируют клетки-мишени, на которых изменены или отсутствуют маркеры, характерные для здоровых клеток. Известно, что такое происходит прежде всего с клетками, мутировавшими или пораженными вирусом. Именно поэтому естественные киллеры играют важную роль в противоопухолевом надзоре, уничтожении клеток, зараженных вирусами. Свое цитотоксическое действие естественные киллеры оказывают с помощью особого белка перфорина, который подобно мембраноатакующему комплексу комплемента образует поры в мембранах клеток-мишеней.

### 9.2.3. Гуморальные факторы

**Система комплемента**. Система комплемента — это многокомпонентная полиферментная самособирающаяся система сывороточных белков, которые в норме находятся в неактивном состоянии. При появлении во внутренней среде микробных продуктов запускается процесс, который называют активацией комплемента. Активация протекает по типу каскадной реакции, когда каждый предшествующий компонент системы активирует последующий. В процессе самосборки системы образуются активные продукты распада белков, которые выполняют три важнейшие функции: вызывают перфорацию мембран и лизис клеток, обеспечивают опсонизацию микроорганизмов для их дальнейшего фагоцитоза и инициируют развитие сосудистых реакций воспаления.

Комплемент под названием «алексин» был описан в 1899 г. французским микробиологом Ж. Борде, а затем немецким микробиологом П. Эрлихом назван комплементом (*complement* — дополнение) как фактор, дополнительный к антителам, вызывающим лизис клеток.

В систему комплемента входит 9 основных белков (обозначаемых как C1, C2−C9), а также субкомпоненты — продукты расщепления этих белков (C1g, C3в, C3a и т.д.), ингибиторы.

Ключевым событием для системы комплемента является его активация. Она может происходить тремя путями: классическим, лектиновым и альтернативным (рис. 9.3).

*Классический путь.* При классическом пути активирующим фактором являются комплексы антиген−антитело. При этом Fc-фрагмент IgM и IgG иммунных комплексов активирует Cr-субкомпонент, Cr расщепляется с образованием C1s, гидролизующей C4, который расщепляется на C4a (анафилотоксин) и C4в. C4в активирует C2, который, в свою очередь, активизирует C3-компонент (ключевой компонент системы). C3-компонент расщепляется на анафилотоксин C3a и опсонин C3в. Активация C5-компонента комплемента также сопровождается образованием двух активных фрагментов белков: C5a — анафилотоксина, хемоаттрактанта для нейтрофилов и C5в — активирующего C6-компонент. В итоге образуется комплекс C5, 6, 7, 8, 9, который называется мембраноатакующим. Терминальная фаза активации комплемента — это образование трансмембранной поры в клетке, выход ее содержимого наружу. В итоге клетка набухает и лизируется.

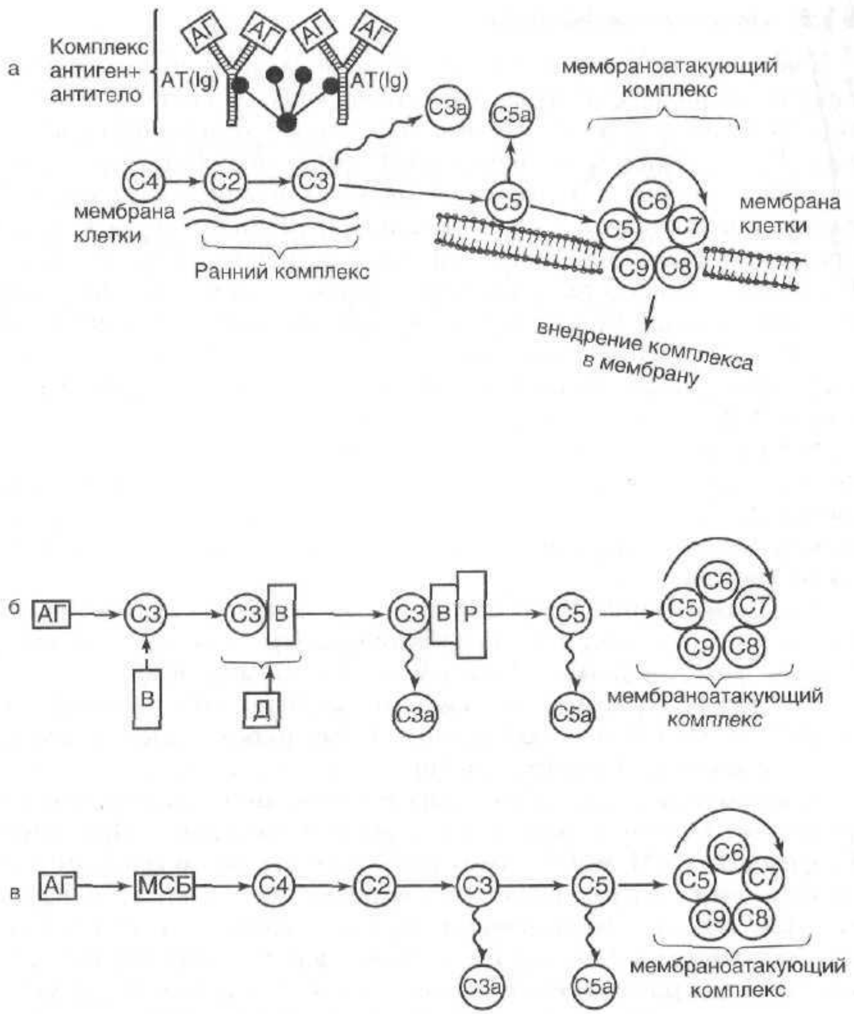



**Рис. 9.3.** Пути активации комплемента: классический (а); альтернативный (б); лектиновый (в); C1–C9 — компоненты комплемента; АГ — антиген; АТ — антитело; ВиД — протеины; Р — пропердин; МСБ — маннозосвязывающий белок

*Лектиновый путь.* Он во многом аналогичен классическому. Различие заключается лишь в том, что при лектиновом пути один из белков острой фазы — связывающий маннозу лектин взаимодействует с маннозой на поверхности микробных клеток (прообраз комплекса антиген—антитело), и этот комплекс активирует C4 и C2.

*Альтернативный путь.* Он идет без участия антител и минуя первые 3 компонента C1–C4–C2. Инициируют альтернативный путь компоненты клеточной стенки грамотрицательных бактерий (липополисахариды, пептидогликаны), вирусы, которые связываются последовательно с белками P (пропердин), B и D. Эти комплексы напрямую конвертируют C3-компонент.

Сложная каскадная реакция комплемента протекает только в присутствии ионов Ca и Mg.

Биологические эффекты продуктов активации комплемента:

- вне зависимости от пути активация комплемента завершается образованием мембраноатакующего комплекса (C5, 6, 7, 8, 9) и лизисом клеток (бактерий, эритроцитов и других клеток);
- образующиеся C3a-, C4a- и C5a-компоненты являются анафилотоксинами, они связываются с рецепторами кровяных и тканевых базофилов, индуцируют их дегрануляцию — выброс гистамина, серотонина и других вазоактивных медиаторов (медиаторов воспалительного ответа). Кроме этого C5a является хемоаттрактантом для фагоцитов, он привлекает эти клетки в очаг воспаления;
- C3в, C4в являются опсонинами, повышают адгезию иммунных комплексов с мембранами макрофагов, нейтрофилов, эритроцитов и тем самым усиливают фагоцитоз.

**Растворимые рецепторы для патогенов**. Это белки крови, непосредственно связывающиеся с различными консервативными, повторяющимися углеводными или липидными структурами микробной клетки (*pattern*-структурами). Эти белки обладают опсоническими свойствами, некоторые из них активируют комплемент.

Основную часть растворимых рецепторов составляют белки острой фазы. Концентрация этих белков в крови быстро нарастает в ответ на развитие воспаления при инфекции или повреждении тканей. К белкам острой фазы относятся:

- C-реактивный белок (он составляет основную массу белков острой фазы), получивший название вследствие способности

связываться с фосфорилхолином (С-полисахаридом) пневмококков. Образование комплекса С-реактивный белок–фосфорилхолин способствует фагоцитозу бактерий, поскольку комплекс связывается с C1g и активирует классический путь комплемента. Белок синтезируется в печени, и его концентрация быстро нарастает в ответ на интерлейкин-6;

- сывороточный амилоид Р близок по структуре и функции к С-реактивному белку;
- маннозосвязывающий лектин активирует комплемент по лектиновому пути, является одним из представителей сывороточных белков-коллектинов, распознающих углеводные остатки и действующих как опсонины. Синтезируется в печени;
- белки сурфактанта легких также принадлежат к семейству коллектинов. Обладают опсоническим свойством, особенно в отношении одноклеточного гриба *Pneumocystis carinii*;
- другую группу белков острой фазы составляют белки, связывающие железо, — трансферрин, гаптоглобин, гемопексин. Такие белки препятствуют размножению бактерий, нуждающихся в этом элементе.

**Антимикробные пептиды**. Одним из таких пептидов является лизоцим. Лизоцим — это фермент муромидаза с молекулярной массой 14 000–16 000, вызывающий гидролиз муреина (пептидогликана) клеточной стенки бактерий и их лизис. Открыт в 1909 г. П.Л. Лащенковым, выделен в 1922 г. А. Флемингом.

Лизоцим содержится во всех биологических жидкостях: сыворотке крови, слюне, слезе, молоке. Он продуцируется нейтрофилами и макрофагами (содержится в их гранулах). Лизоцим в большей степени действует на грамположительные бактерии, основу клеточной стенки которых составляет пептидогликан. Клеточные стенки грамотрицательных бактерий также могут повреждаться лизоцимом, если на них предварительно подействовал мембраноатакующий комплекс системы комплемента.

Дефензины и кателицидины — пептиды, обладающие антимикробной активностью. Они образуются клетками многих эукариот, содержат 13–18 аминокислотных остатков. На сегодняшний день известно около 500 таких пептидов. У млекопитающих бактерицидные пептиды относятся к семействам дефензинов и кателицидинов. В гранулах человеческих макрофагов, нейтрофилов содержатся α-дефензины. Они синтезируются также эпителиальными клетками кишечника, легких, мочевого пузыря.

**Семейство интерферонов**. Интерферон (ИФН) был открыт в 1957 г. А. Айзексом и Ж. Линдеманом при изучении интерференции вирусов (от лат. *inter* — между, *ferens* — несущий). Интерференция — это явление, когда ткани, инфицированные одним вирусом, становятся устойчивыми к заражению другим вирусом. Было установлено, что такая резистентность связана с продукцией зараженными клетками особого белка, который и был назван интерфероном.

В настоящее время интерфероны хорошо изучены. Они представляют собой семейство гликопротеидов с молекулярной массой от 15 000 до 70 000. В зависимости от источника получения эти белки делят на интерфероны I и II типов.

I тип включает ИФН α и β, которые продуцируются инфицированным вирусом клетками: ИФН-α — лейкоцитами, ИФН-β — фибробластами. В последние годы описаны три новых интерферона: ИФН-τ/ε (трофобластный ИФН), ИФН-λ и ИФН-К. В противовирусной защите участвуют ИФН-α и β.

Механизм действия ИФН-α и β не связан с прямым влиянием на вирусы. Он обусловлен активацией в клетке ряда генов, блокирующих репродукцию вируса. Ключевое звено — индукция синтеза протеинкиназы R, которая нарушает трансляцию вирусной мРНК и запускает апоптоз зараженных клеток через Bcl-2 и каспазазависимые реакции. Другой механизм — это активация латентной РНК-эндонуклеазы, которая вызывает деструкцию вирусной нуклеиновой кислоты.

II тип включает интерферон γ. Он продуцируется Т-лимфоцитами и естественными киллерами после антигенной стимуляции.

Интерферон синтезируется клетками постоянно, его концентрация в крови в норме мало меняется. Однако продукция ИФ усиливается при заражении клеток вирусами или действии его индукторов — интерфероногенов (вирусной РНК, ДНК, сложных полимеров).

В настоящее время интерфероны (как лейкоцитарные, так и рекомбинантные) и интерфероногены широко применяются в клинической практике для профилактики и лечения острых вирусных инфекций (грипп), а также с терапевтической целью при хронических вирусных инфекциях (гепатиты В, С, герпес, рассеянный склероз и др.). Поскольку интерфероны обладают не только противовирусной, но и противоопухолевой активностью, они применяются также для лечения онкологических заболеваний.

### 9.2.4. Особенности врожденного и приобретенного иммунитета

В настоящее время факторы врожденного иммунитета не принято называть неспецифическими. Забарьерные механизмы врожденного и приобретенного иммунитета отличаются лишь точностью настройки на «чужое». Фагоциты и растворимые рецепторы врожденного иммунитета распознают «образы», а лимфоциты детали такой картины. Врожденный иммунитет является эволюционно более древним способом защиты, присущим практически всем живым существам от многоклеточных, растений до млекопитающих благодаря быстроте реакции на вторжение чужеродного агента, именно он составляет основу резистентности к инфекции и защищает организм от большинства патогенных микробов. Лишь те возбудители, с которыми не справляются факторы врожденного иммунитета, включают лимфоцитарный иммунитет.

Разделение механизмов антимикробной защиты на врожденные и приобретенные или на доиммунные и иммунные (по Хаитову Р.М., 2006) условно, поскольку если рассматривать иммунный процесс во времени, то и те и другие являются звеньями одной цепи: вначале срабатывают фагоциты и растворимые рецепторы к *pattern*-структурам микробов, без такой редакции в последующем невозможно развитие лимфоцитарного ответа, вслед за этим лимфоциты вновь привлекают фагоциты в качестве эффекторных клеток для деструкции патогенов.

Вместе с тем деление иммунитета на врожденный и приобретенный целесообразно для лучшего осмысления этого сложного явления (табл. 9.2). Механизмы врожденной сопротивляемости обеспечивают быструю защиту, вслед за чем организм выстраивает более прочную, эшелонированную оборону.

**Таблица 9.2.** Особенности врожденного и приобретенного иммунитета

| Врожденный иммунитет | Приобретенный иммунитет |
|---|---|
| Покровный эпителий кожи и слизистых оболочек, химические биологические факторы обеспечивают неспецифическую защиту | |
| Среди субэпителиальных факторов основную роль играют фагоцитирующие клетки и гуморальные медиаторы | Основную роль играют лимфоциты и иммуноглобулины |

*Окончание табл. 9.2*

| Врожденный иммунитет | Приобретенный иммунитет |
|---|---|
| Фагоциты и растворимые рецепторы распознают типовые повторяющиеся углеводные и липидные «узоры» (*pattern*-структуры) на поверхности микроорганизмов (*Toll*-подобные рецепторы фагоцитов и растворимые рецепторы к *pattern*-структурам) | Лимфоциты распознают антигены, главным образом пептиды, с помощью антигенраспознающих рецепторов |
| Репертуар таких типовых *pattern*-структур у простейших, грибов, бактерий, вирусов составляет около 20 вариантов | Существует около 1018 разновидностей антигенов, распознаваемых лимфоцитами |
| Каждый фагоцит содержит *Toll*-рецепторы, распознающие всю палитру *pattern*-структур | Лимфоциты клональны. Каждый лимфоцит имеет рецепторы, распознающие один антиген. Лимфоциты, несущие одинаковые рецепторы, объединены в клон |
| После повреждения эпителия и внедрения патогена в субэпителиальные ткани в течение нескольких часов развивается острый воспалительный ответ, главными эффекторами которого являются лейкоциты и гуморальные медиаторы. Воспалительный ответ необходим для запуска лимфоцитарного ответа | После распознавания антигена происходят пролиферация клона лимфоцитов и увеличение его численности (развивается иммунный ответ). Эффекторные клетки и иммуноглобулины образуются через 7—14 сут |
| Лишен иммунологической памяти. После повторного внедрения патогена развивается воспалительный ответ той же силы и скорости | После первого контакта с антигеном сохраняются клетки памяти. После повторного внедрения того же антигена развивается более быстрый и сильный иммунный ответ |

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Отметьте гуморальные факторы врожденного иммунитета:
1. Комплемент.
2. Интерферон.
3. IgE.
4. Лизоцим.
5. Белки острой фазы.

**Б.** Отметьте компоненты комплемента, которые являются анафилатоксинами:
1. C3a.
2. C1q.
3. C5a.
4. C2.

**В.** Отметьте участников альтернативного пути активации комплемента:
1. C1.
2. C4.
3. C3.
4. Пропердин.
5. IgM.

**Г.** Отметьте участников классического пути активации комплемента:
1. C1.
2. C2.
3. C4.
4. Пропердин.
5. IgM.
6. IgG.

# Глава 10

# АНТИГЕНЫ И ИММУННАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА

## 10.1. Антигены

### 10.1.1. Общие сведения

Жизнедеятельность каждого макроорганизма проходит в непосредственном контакте с чужеродными для него клетками, доклеточными формами жизни и отдельными биоорганическими молекулами. Будучи чужеродными, эти объекты таят в себе огромную опасность, так как могут нарушить гомеостаз, повлиять на течение биологических процессов в макроорганизме и даже повлечь его гибель. Контакт с чужеродными биологическими объектами представляет собой ранний сигнал опасности для иммунной системы, они являются основным раздражителем и объектом системы приобретенного иммунитета. Такие объекты получили название *антигенов* (от греч. *anti* — против, *genos* — создавать).

Современное определение термина «антиген» — это биополимер органической природы, генетически чужеродный для макроорганизма, который при попадании в последний распознается его иммунной системой и вызывает иммунные реакции, направленные на его устранение. Учение об антигенах является ключевым для понимания основ молекулярно-генетических механизмов иммунной защиты макроорганизма, так как антиген является движущей силой иммунного ответа, а также принципов иммунотерапии и иммунопрофилактики.

Антигены имеют разнообразное происхождение. Они являются продуктом природного биологического синтеза любого чужеродного организма, могут образовываться в собственном организме при структурных изменениях уже синтезированных молекул в ходе биодеградации, нарушении их нормального биосинтеза или генетической мутации клеток. Кроме того, антигены могут быть по-

лучены искусственно в результате научной работы или путем направленного химического синтеза. Однако в любом случае молекулу антигена будет отличать генетическая чужеродность по отношению к макроорганизму, в который она попала. Теоретически антигеном может быть молекула любого органического соединения.

Антигены могут попадать в макроорганизм самыми разными путями: через кожные покровы или слизистые оболочки, непосредственно во внутреннюю среду организма, минуя покровы или образовываясь внутри него. При попадании в макроорганизм антигены распознаются иммунокомпетентными клетками и вызывают каскад разнообразных иммунных реакций, направленных на их инактивацию, разрушение и удаление.

### 10.1.2. Свойства антигенов

Характерными свойствами антигенов являются антигенность, иммуногенность и специфичность.

*Антигенность* — это потенциальная способность молекулы антигена активировать компоненты иммунной системы и специфически взаимодействовать с факторами иммунитета (антитела, клон эффекторных лимфоцитов). При этом компоненты иммунной системы взаимодействуют не со всей молекулой антигена, а только с ее небольшим участком, который получил название *антигенной детерминанты*, или *эпитопа*.

Различают *линейные*, или *секвенциальные*, антигенные детерминанты, например первичная аминокислотная последовательность пептидной цепи, и *поверхностные*, или *конформационные*, расположенные на поверхности молекулы антигена и возникшие в результате вторичной или более высокой конформации. На концевых участках молекулы антигена расположены *концевые эпитопы*, а в центре молекулы — *центральные*. Существуют также *глубинные*, или *скрытые*, антигенные детерминанты, которые проявляются при разрушении биополимера.

Размер антигенной детерминанты невелик. Он определяется характеристиками рецепторной части фактора иммунитета и структурой эпитопа. Например, антигенсвязывающий участок молекулы иммуноглобулина способен распознать линейную антигенную детерминанту, состоящую из 5 аминокислотных остатков. Для образования конформационной детерминанты требуется 6–12 аминокислотных остатков. Рецепторному аппарату Т-киллера для

определения чужеродности требуется нанопептид, включенный в состав МНС I класса, Т-хелперу — олигопептид размером 12–25 аминокислотных остатков в комплексе с МНС II класса.

Молекулы большинства антигенов имеют довольно большие размеры. В их структуре определяется множество антигенных детерминант, которые распознаются разными по специфичности антителами и клонами лимфоцитов. Поэтому антигенность вещества зависит от наличия и числа антигенных детерминант в структуре его молекулы.

Структура и состав эпитопа имеют критическое значение. Замена хотя бы одного структурного компонента молекулы приводит к образованию принципиально новой антигенной детерминанты. Денатурация приводит к потере имеющихся антигенных детерминант или появлению новых, а также специфичности.

Чужеродность является обязательным условием для реализации антигенности. Понятие «чужеродность» относительное, так как иммунокомпетентные клетки не способны напрямую анализировать чужеродный генетический код, а лишь продукты, синтезированные с чужеродной генетической матрицы. В норме иммунная система невосприимчива к собственным биополимерам, если он не приобрел черты чужеродности. Кроме того, при некоторых патологических состояниях в результате нарушения регуляции иммунного ответа (см. аутоантигены, аутоантитела, аутоиммунитет, аутоиммунные болезни) собственные биополимеры могут восприниматься иммунной системой как чужие.

Чужеродность находится в прямой зависимости от эволюционного расстояния между организмом и источником антигенов. Чем дальше в таксономическом плане организмы отстоят друг от друга, тем большей чужеродностью и, следовательно, иммуногенностью обладают их антигены. Чужеродность заметно проявляется даже между особями одного вида, так как замена хотя бы одной аминокислоты эффективно распознается антителами в серологических реакциях.

Вместе с тем антигенные детерминанты даже генетически неродственных существ или веществ могут иметь определенное подобие и способны специфически взаимодействовать с одними и теми же факторами иммунитета. Такие антигены получили название *перекрестно реагирующих*. Обнаружено также сходство антигенных детерминант стрептококка, сарколеммы миокарда и базальной

мембраны почек, *Treponema pallidum* и липидной вытяжки из миокарда крупного рогатого скота, возбудителя чумы и эритроцитов человека 0(I) группы крови. Явление, когда один организм маскируется антигенами другого для защиты от факторов иммунитета, получило название *антигенной мимикрии.*

### 10.1.2.1. Иммуногенность

*Иммуногенность* — потенциальная способность антигена вызывать по отношению к себе в макроорганизме специфический продуктивный ответ. Иммуногенность зависит от трех групп факторов: молекулярных особенностей антигена, кинетики антигена в организме, реактивности макроорганизма.

К первой группе факторов отнесены природа, химический состав, молекулярная масса, структура и некоторые другие характеристики.

*Природа* антигена в значительной степени определяет иммуногенность. Наиболее выраженной иммуногенностью обладают белки и полисахариды, наименьшей — нуклеиновые кислоты и липиды. В то же время их сополимеры — липополисахариды, гликопротеиды, липопротеиды — способны в достаточной мере активировать иммунную систему.

Иммуногенность в определенной мере зависит от *химического состава* молекулы антигена. Для белковых антигенов важно разнообразие их аминокислотного состава. Монотонные полипептиды, построенные из одной аминокислоты, практически не активируют иммунную систему. Наличие в структуре молекулы белка ароматических аминокислот, таких, как тирозин, триптофан, существенно повышает иммуногенность.

Важна оптическая изомерия структурных компонентов молекулы антигена. Пептиды, построенные из L-аминокислот, высокоиммуногенны. Полипептидная цепочка, построенная из правовращающих изомеров аминокислот, напротив, может проявлять ограниченную иммуногенность при введении в малых дозах.

В спектре иммуногенности существует определенная иерархия антигенных детерминант: эпитопы различаются по способности индуцировать иммунный ответ. При иммунизации некоторым антигеном будут преобладать реакции к отдельным антигенным детерминантам. Это явление получило название *иммунодоминантности.* По современным представлениям она обусловлена различиями в сродстве эпитопов к рецепторам антигенпрезентирующих клеток.

Большое значение имеют *размер* и *молекулярная масса* антигена. Небольшие полипептидные молекулы с массой менее 5 кД, как правило, низкоиммуногенны. Олигопептид, способный индуцировать иммунный ответ, должен состоять из 6–12 аминокислотных остатков и иметь молекулярную массу около 450 Д. С увеличением размера пептида возрастает его иммуногенность, однако эта зависимость на практике не всегда выполняется. Так, при равной молекулярной массе (около 70 кД) альбумин является более сильным антигеном, чем гемоглобин.

Опытным путем было доказано, что высокодисперсные коллоидные растворы антигена плохо индуцируют иммунный ответ. Гораздо большей иммуногенностью обладают агрегаты молекул и корпускулярные антигены — цельные клетки (эритроциты, бактерии и т.д.). Это связано с тем, что корпускулярные и высокоагрегированные антигены лучше фагоцитируются, чем отдельные молекулы.

Оказалась также существенной стерическая стабильность молекулы антигена. При денатурации белков до желатина вместе с конформационной жесткостью теряется иммуногенность. Поэтому растворы желатина широко используются для парентерального введения.

Важным условием иммуногенности является *растворимость* антигена. Например, высокомолекулярные соединения кератин, меланин, натуральный шелк и др. нерастворимы в воде, не образуют коллоидных растворов в нормальном состоянии и не являются иммуногенами. Благодаря этому свойству конский волос, шелк, кеттут и др. прменяют в клинической практике для сшивания органов и тканей.

Вторая группа факторов связана с динамикой поступления антигена в организм и его выведения. Так, хорошо известна зависимость иммуногенности антигена от *места* и *способа* его *введения*, что обусловлено особенностями строения иммунной системы в местах интервенции антигена.

Сила иммунного ответа зависит от *количества* поступающего антигена: чем его больше, тем выраженнее иммунная реакция макроорганизма.

*Третья группа* объединяет факторы, определяющие зависимость иммуногенности от состояния макроорганизма: наследственности и функциональных характеристик. Хорошо известно, что резуль-

тат иммунизации в определенной мере связан с генотипом особи. Существуют чувствительные и нечувствительные к определенным антигенам роды и виды животных. Например, кролики и крысы практически не реагируют на некоторые бактериальные антигены, которые могут вызывать у морской свинки или мыши чрезвычайно бурный иммунный ответ.

*10.1.2.2. Специфичность*

*Специфичностью* называют способность антигена индуцировать иммунный ответ к строго определенному эпитопу. Специфичность антигена во многом определяется свойствами составляющих его эпитопов.

### 10.1.3. Классификация антигенов

Основываясь на отдельных характерных свойствах, все многообразие антигенов можно классифицировать по происхождению, природе, молекулярной структуре, степени иммуногенности, степени чужеродности, направленности активации и обеспеченности иммунного реагирования.

По *происхождению* различают экзогенные (возникшие вне организма) и эндогенные (возникшие внутри организма) антигены. Среди эндогенных особого внимания заслуживают ауто- и неоантигены. *Аутогенные* антигены (аутоантигены) — это структурно неизмененные антигены собственного организма, синтезируемые в организме в физиологических условиях. В норме аутоантигены неиммуногенны вследствие сформировавшейся *иммунологической толерантности* (невосприимчивости) либо их недоступности для контакта с факторами иммунитета — это так называемые *забарьерные* антигены. При срыве толерантности или нарушении целостности биологических барьеров (воспаление, травма) компоненты иммунной системы начинают специфически реагировать на аутоантигены выработкой специфических факторов иммунитета (аутоантитела, клон аутореактивных лимфоцитов). *Неоантигены*, в отличие от аутоантигенов, возникают в организме в результате генетических мутаций или модификаций и всегда чужеродны.

По *природе*: биополимеры белковой (протеиды) и небелковой (полисахариды, липиды, липополисахариды, нуклеиновые кислоты и др.) природы.

По *молекулярной структуре*: глобулярные (молекула имеет шаровидную форму) и фибриллярные (форма нити).

По *степени иммуногенности*: полноценные и неполноценные. *Полноценные* антигены обладают выраженной антигенностью и иммуногенностью — иммунная система чувствительного организма реагирует на их введение выработкой факторов иммунитета. Такие вещества, как правило, имеют достаточно большую молекулярную массу (более 10 кД), большой размер молекулы (частицы) в виде глобулы и хорошо взаимодействуют с факторами иммунитета.

*Неполноценные* антигены, или *гаптены* (термин предложен К. Ландштейнером), обладают антигенностью — способны специфически взаимодействовать с уже готовыми факторами иммунитета (антителами, лимфоцитами), но не способны при введении в нормальных условиях индуцировать в организме иммунный ответ. Чаще всего гаптенами являются низкомолекулярные соединения (молекулярная масса менее 10 кД).

Если искусственно укрупнить молекулу гаптена — соединить ее прочной связью с достаточно большой белковой молекулой, удается заставить иммунную систему макроорганизма специфически реагировать на гаптен как на полноценный антиген и вырабатывать факторы иммунитета. Молекула белка-носителя получила название *шлеппера* (тягача). При этом специфичность в составе молекулы конъюгата определяется гаптенной частью, а иммуногенность — белком-носителем. Используя для иммунизации конъюгаты, получают антитела к гормонам, лекарственным препаратам и другим низкоиммуногенным соединениям.

По *степени чужеродности*: ксено-, алло- и изоантигены. *Ксеногенные* антигены (или гетерологичные) — общие для организмов, стоящих на разных ступенях эволюционного развития, например, относящиеся к разным родам и видам. Впервые феномен общности ряда антигенов у животных разных видов был отмечен Д. Форсманом (1911 г.). При иммунизации кролика суспензией органов морской свинки ученый получил иммунную сыворотку, способную взаимодействовать с эритроцитами барана. Позже было установлено, что морская свинка и баран имеют ряд структурно сходных антигенных детерминант, дающих перекрестное реагирование. В дальнейшем перечень подобных ксеногенных антигенов был значительно расширен и они получили обобщенное название *«антигены Форсмана»*.

*Аллогенные* антигены (или групповые) — *общие для генетически* неродственных организмов, но относящихся к одному виду. На основании аллоантигенов общую популяцию организмов можно подразделить на отдельные группы. Примером таких антигенов у людей являются антигены групп крови (системы АВ0 и др.). Аллогенные ткани при трансплантации иммунологически несовместимы — они отторгаются или лизируются реципиентом. Микробы на основании групповых антигенов могут быть подразделены на серогруппы, что используется в микробиологической диагностике.

*Изогенные* антигены (или индивидуальные) — общие только для генетически идентичных организмов, например для однояйцовых близнецов, инбредных линий животных. Изотрансплантаты обладают практически полной иммунной совместимостью и не отторгаются. К изоантигенам у людей относятся антигены гистосовместимости, а у бактерий — типовые антигены, не дающие дальнейшего расщепления.

В пределах отдельного организма в определенных органах или тканях обнаруживаются специфичные для них антигены, которые нигде больше не встречаются. Такие антигены получили название *органо-* и *тканеспецифических*.

В зависимости от физико-химических свойств антигена, условий его внедрения, характера реакции и реактивности макроорганизма различают иммуногены, толерогены и аллергены. *Иммуногены* способны индуцировать нормальную продуктивную реакцию иммунной системы — выработку факторов иммунитета (антитела, антигенореактивные клоны лимфоцитов). В клинической практике иммуногены используют для иммунодиагностики, иммунотерапии и иммунопрофилактики многих патологических состояний.

*Толероген* является полной противоположностью иммуногену. Он формирует иммунологическую толерантность или неотвечаемость на эпитопы данного вещества (см. раздел 11.6). Толероген, как правило, — мономер с низкой молекулярной массой, высокой эпитопной плотностью и высокой дисперсностью. Толерогены используют для профилактики и лечения иммунологических конфликтов и аллергии путем наведения искусственной неотвечаемости на отдельные антигены.

*Аллерген*, в отличие от иммуногена, формирует патологическую реакцию организма в виде *гиперчувствительности* немедленного или замедленного типа (см. раздел 11.4). По своим свойствам

аллерген не отличается от иммуногена. В клинической практике аллергены применяют для диагностики инфекционных и аллергических заболеваний.

По направленности активации и обеспеченности иммунного реагирования, т.е. необходимости вовлечения Т-лимфоцитов в индукцию иммунного ответа, выделяют *Т-зависимые* и *Т-независимые* антигены. Иммунная реакция в ответ на введение Т-зависимого антигена реализуется при обязательном участии Т-хелперов. К ним относится большая часть известных антигенов. Для развития иммунного ответа на Т-независимые антигены не требуется привлечение Т-хелперов. Эти антигены способны непосредственно стимулировать В-лимфоциты к антителопродукции, дифференцировке и пролиферации, а также вызывать иммунный ответ у бестимусных животных. Т-независимые антигены имеют относительно простое строение. Это крупные молекулы с молекулярной массой более $10^3$ кД, поливалентны и имеют многочисленные однотипные эпитопы. Т-независимые антигены являются митогенами и поликлональными активаторами, например полимерный флагеллин (сократительный белок жгутиков бактерий), липополисахарид, туберкулин и др.

От Т-независимых антигенов следует отличать *суперантигены*. Это группа веществ, в основном микробного происхождения, которые могут неспецифически вызывать поликлональную реакцию. Молекула суперантигена способна вмешиваться в кооперацию антигенпрезентирующей клетки и Т-хелпера и формировать ложный сигнал распознавания чужеродной субстанции.

Суперантигены способны одновременно неспецифически активировать огромное количество иммунокомпетентных клеток (до 20% и более), вызывать гиперпродукцию цитокинов и низкоспецифичных иммуноглобулинов, массовую гибель лимфоцитов вследствие апоптоза и развитие вторичного функционального иммунодефицита. Свойства суперантигена обнаружены у стафилококкового энтеротоксина, белков вирусов Эпштейна–Барр, бешенства, ВИЧ и некоторых других микробных агентов.

### 10.1.4. Антигены организма человека

Начало изучению аллоантигенных свойств тканей было положено К. Ландштайнером, который в 1901 г. открыл систему групповых антигенов эритроцитов (АВ0). В организме человека

выделяют множество разнообразных антигенов. Они не только нужны для полноценного развития и функционирования всего организма в целом, но также несут важную информацию при клинико-лабораторной диагностике, определении иммунной совместимости органов и тканей в трансплантологии, а также в научных исследованиях. Наибольший медицинский интерес из числа аллогенных антигенов представляют антигены групп крови, среди изогенных — антигены гистосовместимости, а в группе органо- и тканеспецифических — раково-эмбриональные антигены.

*10.1.4.1. Антигены групп крови человека*

Антигены групп крови человека располагаются на цитоплазматической мембране клеток, но наиболее легко определяются на поверхности эритроцитов. Поэтому они получили название *«эритроцитарные антигены»*. На сегодняшний день известно более 250 различных эритроцитарных антигенов. Однако наиболее важное клиническое значение имеют антигены системы АВ0 и Rh (резус-фактор): *их необходимо учитывать при проведении переливания крови*, пересадке органов и тканей, предупреждении и лечении иммуноконфликтных осложнений беременности и т.д.

*Антигены системы АВ0* обнаруживаются в плазме крови, лимфе, секретах слизистых оболочек и других биологических жидкостях, но наиболее выражены на эритроцитах. Они синтезируются многими клетками организма, включая ядросодержащие предшественники эритроцитов, и свободно секретируются в межклеточное пространство. На мембране клеток эти антигены могут появиться либо как продукт клеточного биосинтеза, либо в результате сорбции из межклеточных жидкостей.

Антигены системы АВ0 представляют собой высокогликозилированные пептиды: 85% приходится на углеводную часть и 15% — на полипептидную. Пептидный компонент состоит из 15 аминокислотных остатков. Он постоянен для всех групп крови АВ0 и иммунологически инертен. Иммуногенность молукулы антигена системы АВ0 определяется его углеводной частью.

В системе антигенов АВ0 выделяют три варианта антигенов, различающихся по строению углеводной части: Н, А и В. Базовой молекулой является антиген Н, специфичность которого определяют три углеводных остатка. Антиген А имеет в структуре дополнительный четвертый углеводный остаток — N-ацетил-D-галактозу, а антиген В — D-галактозу. Антигены системы АВ0 имеют неза-

висимое аллельное наследование, что определяет наличие в популяции 4 групп крови: 0(I), A(II), B(III) и AB(IV). Кроме того, антигены A и B имеют несколько аллотипов (например, $A_1$, $A_2$, $A_3$... или $B_1$, $B_2$, $B_3$...), которые встречаются в популяции людей с разной частотой.

Антигены системы AB0 определяют в реакции агглютинации. Однако, учитывая высокий популяционный полиморфизм данной антигенной системы, перед гемотрансфузией обязательно проводят биологическую пробу на совместимость крови реципиента и донора. Ошибка в определении групповой принадлежности и переливание пациенту несовместимой по группе крови приводят к развитию острого внутрисосудистого гемолиза.

Другой важнейшей системой эритроцитарных антигенов является *система резус-антигенов* (*Rh*) или *резус-факторов*. Эти антигены синтезируются предшественниками эритроцитов и обнаруживаются главным образом на эритроцитах, так как они водонерастворимы. Резус-антиген представляет собой термолабильный липопротеид. Выделяют 6 разновидностей этого антигена. Генетическая информация о его строении закодирована в многочисленных аллелях трех сцепленных между собой локусов (D/d, C/c, E/e). В зависимости от наличия или отсутствия резус-антигена в популяции людей различают две группы: резус-положительных и резус-отрицательных индивидуумов.

Совпадение по резус-антигену важно не только при переливании крови, но также для течения и исхода беременности. При беременности резус-отрицательной матери резус-положительным плодом может развиться *резус-конфликт*. Это патологическое состояние связано с выработкой антирезусных антител, способных вызвать иммунологический конфликт: невынашивание беременности или желтуху новорожденного (внутрисосудистый иммунный лизис эритроцитов).

Вследствие того что плотность резус-антигена на мембране эритроцитов невысока и его молекула обладает слабой антигенностью, резус-фактор определяют на мембране эритроцитов в реакции непрямой агглютинации (реакция Кумбса).

### *10.1.4.2. Антигены гистосовместимости*

На цитоплазматических мембранах практически всех клеток макроорганизма обнаруживаются *антигены гистосовместимости*. Большая часть из них относится к системе *главного комплекса*

*гистосовместимости*, или МНС (от англ. *Main Hystocompatibility Complex*). Установлено, что антигены гистосовместимости играют ключевую роль в осуществлении специфического распознавания «свой–чужой» и индукции приобретенного иммунного ответа, определяют совместимость органов и тканей при трансплантации в пределах одного вида и другие эффекты. Большая заслуга в изучении МНС принадлежит Дж. Доссе, П. Догерти, П. Гореру, Г. Снеллу, Р. Цинкернагелю, Р.В. Петрову, ставшими основоположниками *иммуногенетики*.

Впервые МНС был обнаружен в 60-х годах XX века в опытах на генетически чистых (инбредных) линиях мышей при попытке межлинейной пересадки опухолевых тканей (П. Горер, Г. Снелл). У мышей этот комплекс получил название Н-2 и был картирован в 17-й хромосоме.

У человека МНС был описан несколько позже в работах Дж. Доссе. Его обозначили как *HLA* (от англ. *Human Leukocyte Antigen*), так как он ассоциирован с лейкоцитами. Биосинтез *HLA* определяется генами, локализованными сразу в нескольких локусах короткого плеча 6-й хромосомы.

МНС имеет сложную структуру и высокую полиморфность. Антигены гистосовместимости представляют собой гликопротеины, прочно связанные с цитоплазматической мембраной клеток. Их отдельные фрагменты имеют структурное сходство с молекулами иммуноглобулинов и поэтому относятся к единому *суперсемейству*. Различают два основных класса молекул МНС (I и II), которые объединяют множество сходных по структуре антигенов, кодируемых множеством аллельных генов. На клетках индивидуума могут одновременно экспрессироваться не более двух разновидностей продуктов каждого гена МНС. МНС I класса индуцирует преимущественно клеточный иммунный ответ, а МНС II класса — гуморальный.

МНС I класса состоит из двух нековалентно связанных полипептидных цепей ($\alpha$ и $\beta$) с разной молекулярной массой (рис. 10.1). $\alpha$-Цепь имеет внеклеточный участок с доменным строением ($\alpha_1$-, $\alpha_2$- и $\alpha_3$-домены), трансмембранный и цитоплазматический. $\beta$-Цепь представляет собой $\beta_2$-микроглобулин, адгезированный на $\alpha_3$-домен после экспрессии $\alpha$-цепи на цитоплазматической мембране клетки. $\alpha_1$- и $\alpha_2$-Домены $\alpha$-цепи формируют щель Бъеркмана — участок, ответственный за сорбцию и презентацию молекул

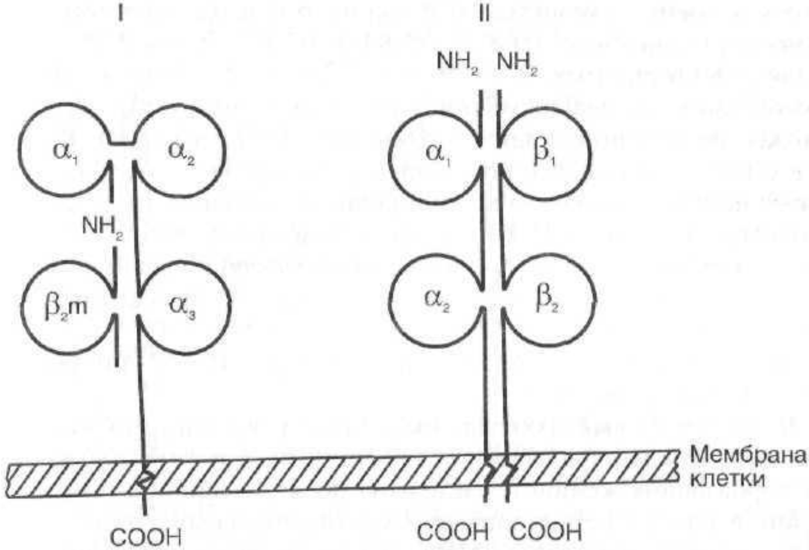



**Рис. 10.1.** Схема строения антигенов главного комплекса гистосовместимости: I — МНС I класса; II — МНС II класса

антигена. Щель Бъеркмана МНС I класса вмещает нанопептид, который легко выявляется специфическими антителами.

Сборка комплекса МНС I класса — антиген протекает внутриклеточно непрерывно в эндоплазматическом ретикулуме. В его состав включаются любые эндогенно синтезированные пептиды, в том числе вирусные, куда они переносятся из цитоплазмы при помощи особого белка, *протеосомы.* Включенный в комплекс пептид придает структурную устойчивость МНС I класса. В его отсутствие функцию стабилизатора выполняет *шаперон* (*калнексин*).

МНС I класса экспрессируются на поверхности практически всех клеток, кроме эритроцитов и клеток ворсинчатого трофобласта (профилактика отторжения плода). Плотность МНС I класса достигает 7000 молекул на клетку, и они покрывают около 1% ее поверхности. Для них характерна высокая скорость биосинтеза — процесс завершается за 6 ч. Экспрессия МНС I класса усиливается под влиянием цитокинов, например γ-интерферона.

В настоящее время у человека различают более 200 различных вариантов *HLA* I класса. Они кодируются генами, картированными

в трех основных сублокусах 6-й хромосомы и наследуются и проявляются независимо: *HLA*-A, *HLA*-B и *HLA*-C. Локус А объединяет более 60 вариантов, В — 130, а С — около 40. Независимое наследование генов сублокусов в популяции формирует бесконечное множество неповторяющихся комбинаций *HLA* I класса. Каждый человек строго уникален по набору антигенов гистосовместимости, исключение составляют только однояйцовые близнецы. Основная биологическая роль *HLA* I класса — они определяют биологическую индивидуальность (*биологический паспорт*) и являются маркерами «своего» для иммунокомпетентных клеток. Заражение клетки вирусом или ее мутация изменяют структуру *HLA* I класса, что является сигналом для активации Т-киллеров ($CD8^+$-лимфоциты) к уничтожению объекта.

*HLA* I класса выявляют на лимфоцитах в реакции микролимфоцитолиза со специфическими сыворотками, которые получают от многорожавших женщин, пациентов после массивной гемотрансфузии, а также с использованием моноклональных антител.

В структуре и функции МНС II класса есть ряд принципиальных отличий. Комплекс образован двумя нековалентно связанными полипептидными цепями ($\alpha$ и $\beta$), имеющими сходное доменное строение (см. рис. 10.1). Обе цепи являются трансмембранными пептидами и «заякорены» в цитоплазматической мембране. Щель Бъеркмана в МНС II класса образована одновременно обеими цепями. Она вмещает олигопептид размером 12–25 аминокислотных остатков, недосягаемый специфическими антителами. МНС II класса включает в себя пептид, захваченный из внеклеточной среды путем эндоцитоза, а не синтезированный самой клеткой. Молекулы МНС II класса экспрессируются на поверхности ограниченного числа клеток: дендритных, В-лимфоцитах, Т-хелперах, активированных макрофагах, тучных, эпителиальных и эндотелиальных клетках. Обнаружение МНС II класса на нетипичных клетках расценивается в настоящее время как иммунопатология. Биосинтез МНС II класса протекает в эндоплазматическом ретикулуме и экспрессируется на цитоплазматической мембране клетки в течение 1 ч после эндоцитоза антигена. Экспрессия комплекса может быть усилена $\gamma$-интерфероном и снижена простагландином $E_2$.

У мыши антиген гистосовместимости получил название Ia-антигена, а у человека по аналогии — *HLA* II класса.

По имеющимся данным, человеческому организму свойствен чрезвычайно высокий полиморфизм *HLA* II класса, который в большей степени определяется особенностями строения β-цепи. В состав комплекса входят продукты трех основных локусов: *HLA*-DR, DQ и DP. При этом локус DR объединяет около 300 аллельных форм, DQ — около 400, а DP — около 500.

Наличие и тип МНС II класса определяют в серологических (микролимфоцитотоксический тест) на В-лимфоцитах и клеточных реакциях иммунитета (смешанная культура лимфоцитов). Специфические антитела к МНС II класса получают так же, как и к I классу. Тестирование в смешанной культуре лимфоцитов позволяет выявить минорные компоненты МНС II класса, не определяемые серологически.

МНС II класса участвуют в индукции приобретенного иммунного ответа. Фрагменты молекулы антигена экспрессируются на цитоплазматической мембране особой группы клеток, которая получила название *антигенпрезентирующих*. Основными являются дендритная клетка, макрофаг и В-лимфоцит. Структура МНС II класса с включенным в него пептидом в комплексе с кофакторными молекулами CD-антигенов воспринимается и анализируется Т-хелперами ($CD4^+$-лимфоциты). В случае распознавания чужеродности Т-хелпер начинает синтез соответствующих иммуноцитокинов, и включается механизм специфического иммунного реагирования: пролиферация и дифференцировка антигенспецифических клонов лимфоцитов.

Помимо описанных выше антигенов гистосовместимости, идентифицирован III класс молекул МНС. Локус, содержащий кодирующие их гены, вклинивается между I и II классами и разделяет их. К МНС III класса относятся некоторые компоненты комплемента (С2, С4), белки теплового шока, факторы некроза опухоли и др.

#### *10.1.4.3. Опухольассоциированные антигены*

В 1948–1949 гг. видный отечественный микробиолог и иммунолог Л.А. Зильбер при разработке вирусной теории рака доказал наличие антигена, специфичного для опухолевой ткани. Позже в 60-х годах XX века Г.И. Абелев (в опытах на мышах) и Ю.С. Татаринов (при обследовании людей) обнаружили в сыворотке крови больных первичным раком печени эмбриональный вариант сывороточного альбумина — *α-фетопротеин*. К настоящему моменту обнаружено и охарактеризовано множество опухольассоциирован-

ных антигенов. Однако не все опухоли содержат специфические маркерные антигены, равно как и не все маркеры обладают строгой тканевой специфичностью.

Опухольассоциированные антигены классифицируют по локализации и генезу. Различают *сывороточные*, секретируемые опухолевыми клетками в межклеточную среду, и *мембранные*. Последние получили название *опухолеспецифических трансплантационных антигенов*, или *TSTA* (от англ. *Tumor-Specific Transplantation Antigen*).

Выделяют также вирусные, эмбриональные, нормальные гиперэкспрессируемые и мутантные опухольассоциированные антигены. *Вирусные* — являются продуктами онковирусов, *эмбриональные* в норме синтезируются в зародышевом периоде. Хорошо известен α-фетопротеин (эмбриональный альбумин), нормальный протеин тестикул (*MAGE* 1,2,3 и др.), маркеры меланомы, рака молочной железы и др. Хорионический гонадотропин, в норме синтезируемый в плаценте, обнаруживается при хориокарциноме и других опухолях. В меланоме в большом количестве синтезируется нормальный фермент тирозиназа. Из *мутантных* белков следует отметить протеин *Ras* — ГТФ-связывающий белок, участвующий в трансмембранном проведении сигнала. Маркерами рака молочной и поджелудочной желез, карцином кишечника являются модифицированные муцины (*MUC* 1, 2 и др.).

В большинстве случаев опухольассоциированные антигены представляют собой продукты экспрессии генов, в норме включаемых в эмбриональном периоде. Они являются слабыми иммуногенами, хотя в отдельных случаях могут индуцировать реакцию цитотоксических Т-лимфоцитов (Т-киллеров) и распознаваться в составе молекул MHC (*HLA*) I класса. Синтезируемые к опухольассоциированным антигенам специфические антитела не угнетают рост опухолей.

#### *10.1.4.4. CD-антигены*

На мембране клеток обнаруживаются групповые антигены, объединяющие клетки с определенными морфофункциональными характеристиками. Эти молекулы получили название антигенов кластеров дифференцировки клетки, или CD-антигенов (от англ. *Cell Differentiation Antigens*, или *Claster Definition*). По структуре они являются гликопротеинами и в большинстве своем относятся к суперсемейству иммуноглобулинов.

Список CD-маркеров довольно обширный и насчитывает около 200 вариантов. Среди многообразия CD-антигенов наиболее широкое распространение получили маркеры иммунокомпетентных клеток. Например, CD3 экспрессируется в популяции Т-лимфоцитов, CD4 — Т-хелперов, а CD8 — цитотоксических Т-лимфоцитов Т-киллеров, CD11a — моно- и гранулоцитов, CD11b — естественных киллеров, CD19–22 — В-лимфоцитов. Информация о структуре закодирована в различных участках генома, а экспрессия зависит от стадии дифференцировки клетки и ее функционального состояния.

CD-антигены имеют значение в диагностике иммунодефицитных состояний. Определение CD-маркеров осуществляется в иммунологических реакциях с использованием моноклональных антител.

### 10.1.5. Антигены микробов

#### *10.1.5.1. Антигены бактерий*

В структуре бактериальной клетки различают жгутиковые, соматические, капсульные и некоторые другие антигены (рис. 10.2). *Жгутиковые*, или *Н-антигены*, локализуются в их жгутиках и представляют собой эпитопы сократительного белка флагеллина. При нагревании флагеллин денатурирует и Н-антиген теряет свою специфичность. Фенол не действует на этот антиген.

*Соматический*, или *О-антиген*, связан с клеточной стенкой бактерий. Его основу составляют липополисахариды. О-антиген термостабилен и не разрушается при длительном кипячении. Однако альдегиды (например, формалин) и спирты нарушают его структуру.

Если проиммунизировать животное живыми бактериями, имеющими жгутики, то будут вырабатываться антитела одновременно к О- и Н-антигенам. Введение животному прокипяченной культуры стимулирует биосинтез антител к соматическому антигену. Культура бактерий, обработанная фенолом, вызовет образование антител к жгутиковым антигенам.

*Капсульные*, или *К-антигены*, встречаются у бактерий, образующих капсулу. Как правило, К-антигены состоят из кислых полисахаридов (уроновые кислоты). В то же время у бациллы сибирской язвы этот антиген построен из полипептидных цепей. По чувствительности к нагреванию различают три типа К-антигена: А, В и L.

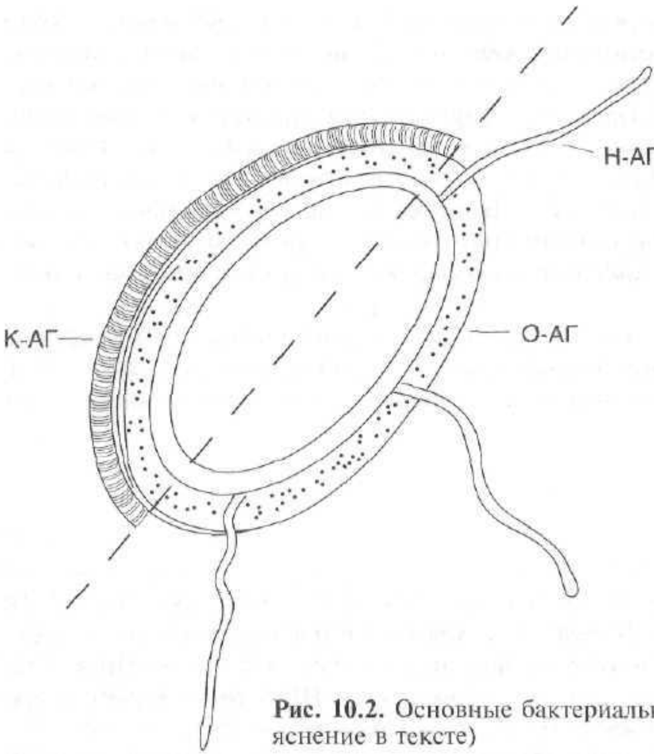



**Рис. 10.2.** Основные бактериальные антигены (пояснение в тексте)

*Наибольшая термостабильность характерна для группы* А — *они* не денатурируют даже при длительном кипячении. Группа В выдерживает непродолжительное нагревание (около 1 ч) до 60 °С. Группа L быстро разрушается при этой температуре. Поэтому частичное удаление К-антигена возможно путем длительного кипячения бактериальной культуры.

На поверхности возбудителя брюшного тифа и других энтеробактерий, которые обладают высокой вирулентностью, можно обнаружить особый вариант капсульного антигена. Он получил название *антигена вирулентности*, или *Vi-антигена*. Обнаружение этого антигена или специфичных к нему антител имеет большое диагностическое значение.

Антигенными свойствами обладают также бактериальные *белковые токсины*, *ферменты* и некоторые другие вещества, которые секретируются бактериями в окружающую среду (например, тубер-

кулин). Столбнячный, дифтерийный и ботулинический токсины относятся к числу сильных полноценных антигенов, поэтому их используют для получения молекулярных вакцин — анатоксинов.

В антигенном составе некоторых бактерий выделяется группа антигенов с сильно выраженной иммуногенностью, чья биологическая активность играет ключевую роль в формировании патогенности возбудителя — связывание таких антигенов специфическими антителами практически полностью инактивирует вирулентные свойства микроорганизма и обеспечивает к нему иммунитет. Эти антигены получили название *протективных*.

#### 10.1.5.2. Антигены вирусов

В структуре вирусной частицы различают *ядерные* (или коровые), *капсидные* (или оболочечные) и *суперкапсидные* антигены. На поверхности некоторых вирусных частиц встречаются особые *V-антигены* — гемагглютинин и фермент нейраминидаза. Антигены вирусов различаются по происхождению. Часть из них вирусоспецифические, кодируются в нуклеиновой кислоте вируса. Другие, являющиеся компонентами клетки хозяина (углеводы, липиды), формируют суперкапсид вируса при его рождении путем почкования.

Антигенный состав вириона зависит от строения самой вирусной частицы. В просто организованных вирусах антигены ассоциированы с нуклеопротеидами. Эти вещества хорошо растворяются в воде и поэтому обозначаются как S-антигены (от лат. *solutio* — раствор). У сложноорганизованных вирусов часть антигенов связана с нуклеокапсидом, а другая находится во внешней оболочке, или суперкапсиде.

Антигены многих вирусов отличаются высокой степенью изменчивости, что связано с постоянными мутациями в генетическом материале вирусов. Примером могут служить вирус гриппа, ВИЧ и др.

### 10.1.6. Процессы, происходящие с антигеном в макроорганизме

Антигенная интервенция — это процесс, протекающий поэтапно с определенной динамикой во времени. При этом на каждом этапе появления и распространения в макроорганизме антиген сталкивается с мощным противодействием развитой сети разнообразных факторов иммунитета (табл. 10.1).

**Таблица 10.1.** Процессинг антигена в макроорганизме

| Происхождение антигена | Входные ворота | Факторы иммунной защиты | | Механизмы защиты | Исход |
|---|---|---|---|---|---|
| | | врожденные | приобретенные | | |
| Экзогенное<br>Эндогенное | Кожа<br>Слизистые оболочки<br>Желудочно-кишечный тракт<br>Дыхательные пути<br>Урогенитальный тракт<br>Кровь<br>Лимфа | Механические барьеры (кожа, слизистые оболочки)<br>Физико-химические барьеры (ферменты, лизоцим, pH и др.)<br>Биологические барьеры (фагоцитоз, комплемент, интерферон, защитные белки сыворотки крови и др.) | Антителообразование<br>Иммунный фагоцитоз<br>Киллерная функция лимфоцитов<br>Гиперчувствительность замедленного типа<br>Гиперчувствительность немедленного типа<br>Толерантность<br>Иммунная память | Инактивация<br>Деструкция<br>Выведение антигена<br>Ареактивность | Восстановление гомеостаза<br>Формирование иммунной памяти<br>Формирование иммунной толерантности<br>Формирование аллергии |

Выделяют несколько путей проникновения и распространения антигена в макроорганизме. Они могут появляться внутри самого макроорганизма (эндогенное происхождение) или поступать извне (экзогенное происхождение). Экзогенные антигены могут проникнуть в макроорганизм:

- через дефекты кожных покровов и слизистых оболочек (как результат ранений, микротравм, укусов насекомых, расчесов и др.);
- путем всасывания в желудочно-кишечном тракте (эндоцитоз эпителиальными клетками);
- межклеточно (при незавершенном фагоцитозе);
- чресклеточно (так распространяются облигатные внутриклеточные паразиты, например вирусы).

В организме антиген может распространяться с лимфой (лимфогенный путь) и кровью (гематогенный путь) по различным органам и тканям. При этом чаще всего он фильтруется в лимфоузлах, селезенке, а также в лимфоидных скоплениях печени, кишечника и других органов, где вступает в контакт с факторами иммунной защиты.

Ответная реакция этих факторов возникает практически немедленно. Первыми вступают в действие факторы врожденного иммунитета, так как эта система не требует длительного времени для активации. Если антиген не был инактивирован или элиминирован в течение 4 ч, включается система приобретенного иммунитета: обеспечивается специфическое распознавание *«свой—чужой»*, вырабатываются факторы регуляции (цитокины) и иммунной защиты (специфические антитела, клоны антигенореактивных лимфоцитов).

Совокупный эффект всех звеньев и уровней иммунной защиты макроорганизма, независимо от степени их вовлечения в процесс, направлен на:

- связывание и блокирование биологически активных участков молекулы антигена;
- разрушение или отторжение антигена;
- утилизацию, изоляцию (инкапсуляцию) или выведение остатков антигена из макроорганизма.

В итоге достигается восстановление гомеостаза и структурной целостности макроорганизма. Параллельно формируется иммунная память, толерантность или аллергия.

## 10.2. Иммунная система человека

*Специфическую функцию надзора за генетическим постоянством* внутренней среды организма, сохранения его биологической и видовой индивидуальности осуществляет иммунная система.

### 10.2.1. Структурно-функциональные элементы иммунной системы

Иммунная система — это специализированная, анатомически обособленная лимфоидная ткань. Она распределена по всему организму в виде различных лимфоидных образований и отдельных клеток, и на ее долю приходится 1–2% от массы тела. В анатомическом плане иммунная система подразделена на центральные и периферические органы, в функциональном — на органы воспроизводства и селекции клеток (костный мозг, тимус), контроля внешней среды или экзогенной интервенции (лимфоидные системы кожи и слизистых оболочек), контроля генетического постоянства внутренней среды (селезенка, лимфатические узлы, печень, кровь, лимфа).

Основными функциональными клетками являются лимфоциты. Их количество в организме достигает $10^{12}$. К числу функциональных клеток иммунной системы относят также мононуклеарные и гранулярные лейкоциты, тучные и дендритные клетки. Часть клеток сосредоточена в отдельных органах иммунной системы, другие свободно перемещаются по всему организму. Схематическое строение иммунной системы представлено на рис. 10.3.

#### *10.2.1.1. Центральные органы иммунной системы*

Центральные органы иммунной системы, костный мозг и вилочковая железа или тимус, — это органы воспроизводства и селекции клеток иммунной системы. Здесь происходят *лимфопоэз* — рождение, размножение (пролиферация) и дифференцировка лимфоцитов до стадии предшественников или зрелых неиммунных (наивных) клеток, а также их «обучение». У птиц к центральным органам иммунной системы относят сумку Фабрициуса (*bursa Fabricii*), локализованную в области клоаки.

*Костный мозг* располагается в губчатом веществе костей (эпифизы трубчатых костей, грудина, ребра и др.). Здесь находятся полипотентные стволовые клетки (ППСК), которые являются ро-

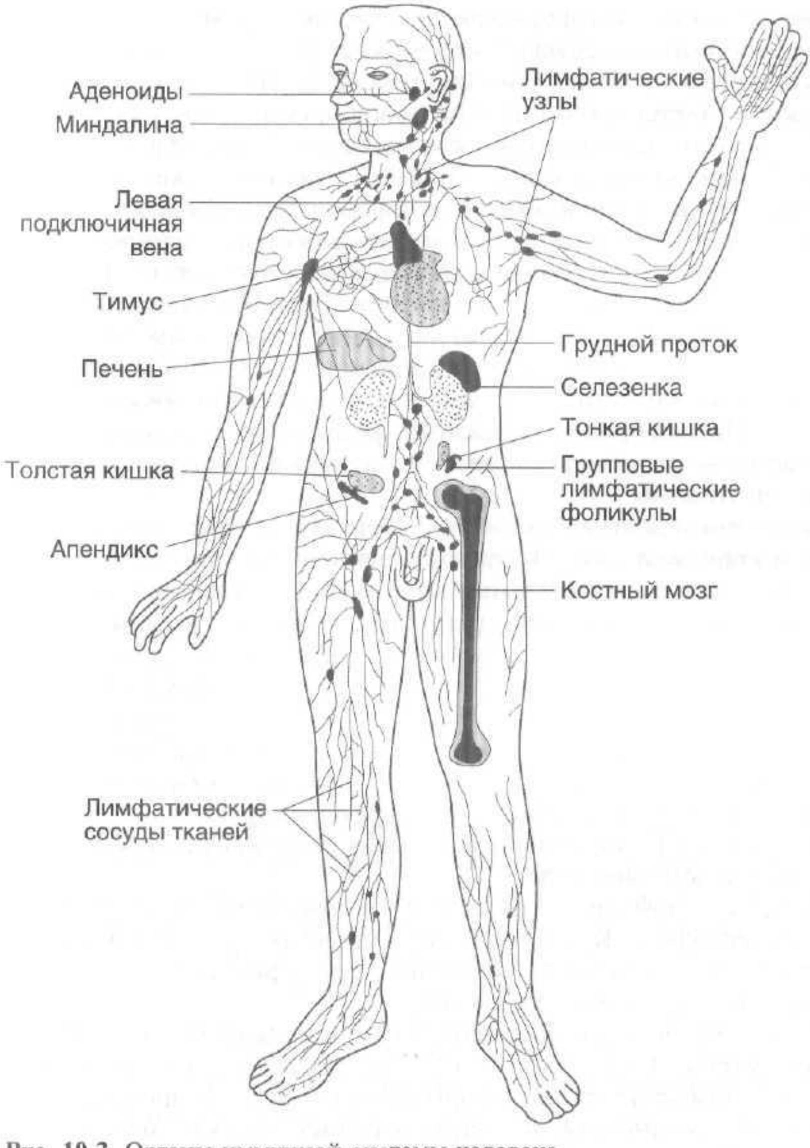



**Рис. 10.3.** Органы иммунной системы человека

доначальницами всех форменных элементов крови, включая иммунокомпетентные клетки. В строме костного мозга формируются предшественники В- и Т-лимфоцитов, которые впоследствии мигрируют соответственно в В-зоны макроорганизма и тимус. Фагоциты и некоторые дендритные клетки также образуются в костном мозгу. В нем можно также обнаружить плазматические клетки — результат терминальной дифференцировки В-лимфоцитов.

*Вилочковая железа, тимус,* или *зобная железа,* располагается в верхней части загрудинного пространства. Этот орган отличается особым морфогенезом. Тимус формируется в период внутриутробного развития. К моменту рождения масса тимуса достигает 10–15 г, окончательно он созревает к пятилетнему возрасту, а максимального размера достигает к 10–12 годам жизни (масса 30–40 г). После периода полового созревания начинается инволюция органа — происходит замещение лимфоидной ткани жировой и соединительной.

Тимус имеет дольчатое строение. В его структуре различают мозговой и корковый слои. В строме коркового слоя находится большое количество эпителиальных клеток коры, названных «клетки-няньки», которые своими отростками образуют мелкоячеистую сеть, где располагаются созревающие лимфоциты. В пограничном, корково-мозговом, слое располагаются дендритные клетки тимуса, а в мозговом — эпителиальные клетки мозгового слоя.

Предшественники Т-лимфоцитов поступают из костного мозга в корковый слой тимуса. Здесь под влиянием тимических факторов они активно размножаются, дифференцируются (превращаются) в зрелые Т-лимфоциты и «учатся» распознавать чужеродные антигенные детерминанты.

Процесс «обучения» включает *положительную* и *отрицательную селекцию.* Критерием «обученности» являются качество Т-клеточной антигенной рецепции (специфичность и аффинность) и жизнеспособность клетки.

*Положительная селекция* происходит в корковом слое при помощи эпителиальных клеток. Суть ее заключается в поддержке клонов Т-лимфоцитов, рецепторы которых эффективно связались с экспрессированными на эпителиальных клетках молекулами МНС, независимо от структуры инкорпорированных собственных олигопептидов. Эпителиоциты коры выделяют ростовые факторы тимуса, активирующие размножение Т-лимфоцитов.

*Отрицательную селекцию* осуществляют дендритные клетки в пограничной корково-мозговой зоне тимуса. Ее цель — выбраковка аутореактивных клонов Т-лимфоцитов. Клетки, позитивно реагирующие на комплекс МНС–аутологичный пептид, подвергаются уничтожению путем индукции у них апоптоза.

В итоге селекции более 99% Т-лимфоцитов не выдерживают испытаний и погибают. Лишь менее 1% клеток превращается в зрелые формы, способные распознать в комплексе с аутологичными МНС только чужеродные биополимеры. Ежесуточно около $10^6$ зрелых «обученных» Т-лимфоцитов покидают тимус с крово- и лимфотоком и мигрируют в различные органы и ткани.

Созревание и «обучение» Т-лимфоцитов в тимусе имеет важное значение для формирования иммунитета. Отсутствие или недоразвитие тимуса при врожденном дефекте развития вилочковой железы — аплазии или гипоплазии органа, ее хирургическом удалении или радиационном поражении ведет к резкому снижению эффективности иммунной защиты макроорганизма. Между тем тимэктомия у взрослых практически не приводит к серьезным дефектам в иммунитете.

#### *10.2.1.2. Периферические органы иммунной системы*

К периферическим органам иммунной системы относят селезенку, лимфатические узлы, аппендикс, печень, миндалины глоточного кольца, групповые лимфатические фолликулы, кровь, лимфу и др. В этих органах проходит иммуногенез — размножение и окончательное созревание предшественников иммунокомпетентных клеток и осуществляется иммунологический надзор. В функциональном плане периферические органы иммунной системы могут быть подразделены на органы контроля внутренней среды организма (лимфатические узлы, селезенка, тканевые мигрирующие клетки) и его кожных и слизистых покровов (аппендикс, лимфатические фолликулы и скопления).

*Лимфатические узлы* — мелкие округлые анатомические образования бобовидной формы, которые располагаются по ходу лимфатических сосудов. Каждый участок тела имеет региональные лимфоузлы. В общей сложности в организме человека насчитывается до 1000 лимфоузлов. Лимфатические узлы выполняют функцию биологического сита — через них фильтруется лимфа и задерживаются и концентрируются антигены. Через лимфоузел проходит в среднем около $10^9$ лимфоцитов в 1 ч.

В строении лимфоузла различают корковое и мозговое вещество. Строма коры разделена соединительнотканными трабекулами на сектора. В ней выделяют поверхностный корковый слой и паракортикальную зону. В секторах поверхностного коркового слоя расположены лимфатические фолликулы с центрами размножения В-лимфоцитов (герминативные центры). Здесь же обнаруживаются фолликулярные дендритные клетки, способствующие созреванию В-лимфоцитов. Паракортикальный слой — это зона Т-лимфоцитов и интердигитальных дендритных клеток, потомков дермальных клеток Лангерганса. Мозговое вещество образовано тяжами соединительной ткани, между которыми располагаются макрофаги и плазматические клетки.

В пределах лимфоузла происходит антигенная стимуляция иммунокомпетентных клеток и включается система специфического иммунного реагирования, направленная на обезвреживание антигена.

*Селезенка* — это орган, через который фильтруется вся кровь. Он располагается в левой подвздошной области и имеет дольчатое строение. Лимфоидная ткань образует белую пульпу. В строении различают первичные, периартериальные лимфоидные фолликулы (окружают артерии по их ходу) и вторичные, располагающиеся на границах первичных фолликулов. Первичные лимфоидные скопления заселены преимущественно Т-лимфоцитами, а вторичные — В-лимфоцитами и плазматическими клетками. Кроме того, в строме селезенки обнаруживают фагоциты и ретикулярные дендритные клетки.

В селезенке, как в сите, задерживаются антигены, оказавшиеся в кровотоке, и состарившиеся эритроциты. Этот орган называют кладбищем эритроцитов. Здесь происходят антигенная стимуляция иммунокомпетентных клеток, развитие специфической иммунной реакции на антиген и его обезвреживание.

*Печень* играет особую роль в иммунной системе. В ней находится более половины всех тканевых макрофагов и большая часть естественных киллеров. Лимфоидные популяции печени обеспечивают толерантность к пищевым антигенам, а макрофаги утилизируют иммунные комплексы, в том числе сорбированные на стареющих эритроцитах.

*Групповые лимфатические фолликулы* (пейеровы бляшки) являются скоплением лимфоидной ткани в слизистой оболочке тонкой кишки. Такие образования также находятся в червеобразном отростке слепой кишки — аппендиксе. Кроме того, на всем протяже-

нии желудочно-кишечного тракта, начиная с пищевода и кончая анальным отверстием, располагаются единичные лимфатические фолликулы. Они обеспечивают местный иммунитет слизистой оболочки кишки и ее просвета и регулируют видовой и количественный состав ее нормальной микрофлоры.

Скопление лимфоидных элементов в виде *миндалин глоточного кольца* обеспечивает местный иммунитет в носоглотке, ротовой полости и верхних дыхательных путях, защищает их слизистые оболочки от внедрения микробов и других генетически чужеродных агентов, передающихся воздушно-капельным или воздушно-пылевым путем, и регулирует локальную нормофлору.

*Лимфа* — жидкая ткань организма, которая содержится в лимфатических сосудах и узлах. Она включает в себя все соединения, поступающие из межтканевой жидкости. Основными и практически единственными клетками лимфы являются лимфоциты. В ее составе эти клетки осуществляют кругооборот в организме.

В *кровь* циркулируют предшественники и зрелые Т- и В-лимфоциты, полиморфно-ядерные лейкоциты, моноциты. Лимфоциты составляют 30% общего количества лейкоцитов. Одномоментно в крови присутствует менее 2% общего количества лимфоцитов.

### *10.2.1.3. Клетки иммунной системы*

Специфическую функцию иммунной защиты непосредственно осуществляет многочисленный пул клеток миелоидного и лимфоидного ростков крови: лимфоциты, фагоциты и дендритные клетки. Это основные клетки иммунной системы. Кроме них, в иммунный ответ может вовлекаться множество других клеточных популяций (эпителий, эндотелий, фибробласты и др.). Перечисленные клетки *различаются морфологически, по функциональной активности*, маркерам (специфические молекулярные метки), рецепторному аппарату и продуктам биосинтеза. Тем не менее большую часть клеток иммунной системы объединяет близкое генетическое родство: они имеют общего предшественника, полипотентную стволовую клетку костного мозга (рис. 10.4).

На поверхности цитоплазматической мембраны клеток иммунной системы существуют особые молекулы, которые служат их маркерами. В 80-х годах прошлого века была принята международная номенклатура мембранных маркеров лейкоцитов человека, названных «*CD-антигены*» (табл. 10.2)

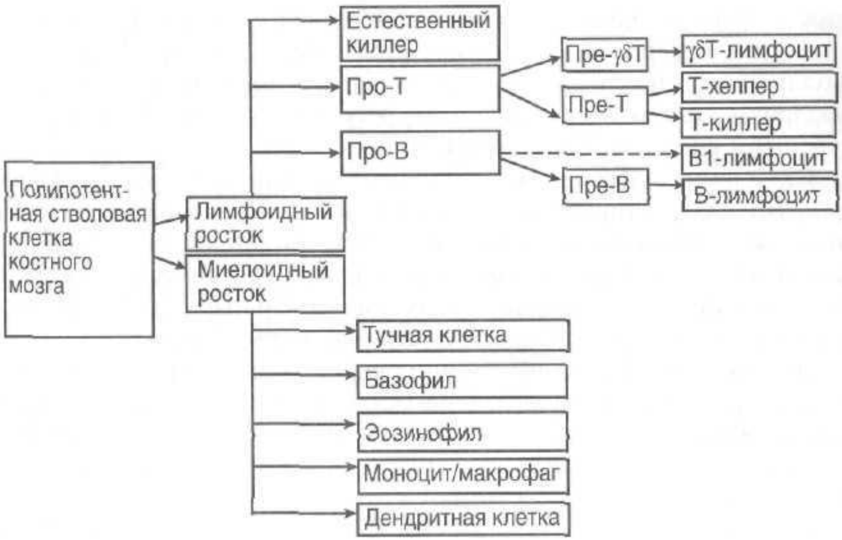



**Рис. 10.4.** Схема иммуногенеза (пояснения в тексте)

**Таблица 10.2.** Основные CD-маркеры клеток, участвующих в иммунном ответе

| CD-маркер | Тип клеток | Функция |
|---|---|---|
| CD1 | Т-лимфоцит | Молекула МНС I класса, связанная с β-микроглобулином, участвует в представлении антигена |
| CD2 | Т-лимфоцит | Осуществляет адгезию цитотоксических Т-лимфоцитов к клеткам-мишеням, Т-лимфоцитов к эндотелию, тимоцитов к тимическим эпителиальным клеткам |
| CD3 | Т-лимфоцит | Молекулы, ассоциированные с рецептором Т-лимфоцитов. Участвуют в проведении сигнала от рецептора путем активации цитоплазматической тирозинкиназы Маркер абсолютного большинства всех зрелых Т-лимфоцитов |
| CD4 | Т-лимфоцит | Маркер Т-хелперов Ко-рецептор для Т-клеточного рецептора |
| CD5 | Т- и В-лимфоциты | Маркер В1-лимфоцитов |

*Продолжение табл. 10.2*

| CD-маркер | Тип клеток | Функция |
|---|---|---|
| CD 8 | Т-лимфоцит | Маркер цитотоксических Т-лимфоцитов<br>Ко-рецептор для Т-клеточного рецептора |
| CD11d | Лейкоциты | αD-субъединица интегрина α, связанная с CD18 |
| CD14 | Моноциты | Рецептор для ЛПС |
| CD16 | Естественный киллер | Участвуют в АЗКЦТ<br>Является Fc-рецептором |
| CD18 | Лейкоциты | Интегрин β, вовлекаемый в процесс взаимодействия между клетками и клеток с матриксом |
| CD19 | В-лимфоцит | Ко-рецептор для В-клеточного иммунорецептора |
| CD20 | В-лимфоцит | Регулирует активацию В-клеток, формируя кальциевые каналы |
| CD21 | Зрелые В-лимфоциты | Ко-рецептор для В-клеточного иммунорецептора<br>Рецептор для C3d-компонента комплемента и вируса Эпштейна–Барр |
| CD22 | В-лимфоцит | Маркер зрелых В-лимфоцитов<br>Осуществляет адгезию В-клеток к эритроцитам, Т-клеткам, моноцитам и нейтрофилам |
| CD25 | Т-лимфоцит | Маркер активированного лимфоцита<br>Рецептор для ИЛ-2 |
| CD28 | Т-лимфоцит | Рецептор Т-хелпера для взаимодействия с ко-стимулирующим фактором (CD80/86) АПК |
| CD30 | Активированные Т- и В-лимфоциты, естественный киллер и моноциты | Усиливает пролиферацию Т- и В-клеток после связывания с лигандом |
| CD40 | В-лимфоцит | Участвует в В-клеточной активации, пролиферации и дифференцировке после связывания CD40-лиганда |
| CD56 | Естественный киллер | Активация цитотоксичности и цитокиновой продукции |

*Окончание табл. 10.2*

| CD-маркер | Тип клеток | Функция |
|---|---|---|
| CD64 | Моноциты, макрофаги | Высокоаффинный рецептор для IgG ($IgG_3 > IgG_1 > IgG_4 >>> IgG_2$) |
| CD94 | Естественный киллер | Ингибиция/активация цитотоксичности естественных киллеров |
| CD95 | Разные клетки | Маркер апоптоза клетки |

Примечание. АЗКЦТ — антителозависимая клеточно-опосредованная цитотоксичность; АПК — антигенпрезентирующие клетки.

По функциональной активности клетки-участники иммунного ответа подразделяют на регуляторные (индукторные), эффекторные и антигенпрезентирующие. *Регуляторные* клетки управляют функционированием компонентов иммунной системы путем выработки медиаторов — иммуноцитокинов и лигандов. Эти клетки определяют направление развития иммунного реагирования, его интенсивность и продолжительность. *Эффекторы* являются непосредственными исполнителями иммунной защиты путем прямого воздействия на объект либо путем биосинтеза биологически активных веществ со специфическим эффектом (антитела, токсичные субстанции, медиаторы и пр.).

*Антигенпрезентирующие клетки* выполняют ответственную задачу: захватывают, процессируют (перерабатывают путем ограниченного протеолиза) и представляют антиген иммунокомпетентным Т-клеткам в составе комплекса с МНС II класса. АПК лишены специфичности в отношении самого антигена. Молекула МНС II класса может включать в себя любые эндоцитированные из межклеточной среды олигопептиды, как свои собственные, так и чужие. Установлено, что большая часть комплексов МНС II класса содержит аутогенные молекулы и лишь малая доля — чужеродный материал.

Помимо МНС II класса, АПК экспрессируют ко-стимулирующие факторы (CD40, 80, 86) и множество молекул адгезии. Последние обеспечивают тесный, пространственно стабильный и продолжительный контакт АПК с Т-хелпером. Кроме того, АПК экспрессируют молекулы CD1, с помощью которых могут презентировать липосодержащие или полисахаридные антигены.

Основными профессиональными АПК являются дендритные *клетки костно-мозгового происхождения*, *В-лимфоциты и макро-*

фаги. Дендритные клетки почти в 100 раз эффективнее макрофагов. Функцию непрофессиональных АПК могут также выполнять некоторые другие клетки в состоянии активации — эпителиальные клетки и эндотелиоциты.

Осуществление целенаправленной иммунной защиты макроорганизма возможно благодаря наличию на клетках иммунной системы специфических антигенных рецепторов (иммунорецепторов). По механизму функционирования они подразделяются на прямые и непрямые. *Прямые иммунорецепторы* непосредственно связываются с молекулой антигена. *Непрямые иммунорецепторы* взаимодействуют с молекулой антигена опосредованно — через Fc-фрагмент молекулы иммуноглобулина (см. раздел 11.1.2). Это так называемый *Fc-рецептор* (*FcR*).

Fc-рецепторы различаются по аффинности. Высокоаффинный рецептор может связываться с интактными молекулами IgE или IgG4 и образовывать рецепторный комплекс, в котором антигенспецифическую ко-рецепторную функцию выполняет молекула иммуноглобулина. Такой рецептор есть у базофилов и тучных клеток. Низкоаффинный *FcR* распознает молекулы иммуноглобулина, уже образовавшие иммунные комплексы. Он обнаруживается на макрофагах, естественных киллерах, эпителиальных, дендритных и множестве других клеток.

Иммунное реагирование основано на тесном взаимодействии различных клеточных популяций. Это достигается при помощи биосинтеза клетками иммунной системы широкого спектра иммуноцитокинов. Подавляющее большинство клеток иммунной системы постоянно перемещается во внутренних средах организма с крово- и лимфотоком и благодаря амебоидной подвижности.

Клеточно-элементный состав иммунной системы постоянно возобновляется за счет деления стволовых клеток. Состарившиеся, выработавшие свой биологический ресурс, ложно активированные, зараженные и генетически трансформированные клетки уничтожаются.

#### *10.2.1.3.1. Лимфоциты*

Лимфоциты — подвижные мононуклеарные клетки. В зависимости от места созревания эти клетки подразделяются на две *популяции* Т- (тимус) и В- (бурса Фабрициуса, костный мозг) *лимфоцитов*. Лимфоциты играют ключевую роль в обеспечении приобретенного (адаптивного) иммунитета. Они осуществляют

специфическое распознавание антигена, индукцию клеточного и гуморального иммунного ответа, различные формы иммунного реагирования.

В организме непрерывно идет возобновление популяций лимфоцитов, клетки активно мигрируют между различными органами и тканями. Вместе с тем миграция и расселение лимфоцитов в тканях не являются хаотическим процессом. Он имеет направленный характер и строго регулируется экспрессией на мембране лимфоцитов, эндотелии сосудов и клеточных элементах стромы особых молекул адгезии (интегрины, селектины и др.). Так, незрелые Т-лимфоциты активно мигрируют в тимус. Зрелые неиммунные («наивные») лимфоциты тропны к периферическим лимфоидным органам и тканям. При этом Т- и В-лимфоциты заселяют только *«свои» области — это так называемый эффект хоминговой рецепции* (от англ. *home* — дом). Зрелые иммунные (активированные) лимфоциты распознают эпителий в очаге воспаления. Клетки иммунологической памяти всегда возвращаются в места своего происхождения.

Продолжительность жизни неиммунных лимфоцитов достаточно большая. У Т-лимфоцитов она достигает нескольких месяцев или лет, а у В-клеток — недель или месяцев. Дольше всех живут клетки иммунологической памяти (см. раздел 11.5) — до 10 лет и более. Однако *активированные или терминально дифференцированные* лимфоциты имеют короткую продолжительность жизни (несколько суток). Состарившиеся, ложно активированные и аутореактивные (реагирующие на аутоантигены) лимфоциты подвергаются уничтожению путем индукции у них апоптоза. Погибшие лимфоциты постоянно заменяются новыми за счет их пролиферации в центральных и периферических органах иммунной системы. Численность лимфоидных популяций находится под жестким контролем клеток самой иммунной системы.

Для выполнения специфической функции лимфоциты несут на своей поверхности прямые антигенные рецепторы и являются иммунокомпетентными клетками. Иммунорецептор В-лимфоцита и особого $\gamma\delta$Т-лимфоцита распознает нативный эпитоп, т.е. непосредственно отличает чужеродные субстанции. Иммунорецептор традиционного Т-лимфоцита ориентирован на олигопептиды в составе МНС, т.е. распознает измененное «свое».

Антигенспецифические рецепторы лимфоцитов имеют сложное молекулярное строение, уникальное для каждой клетки. Напри-

мер, у Т-лимфоцитов они состоят из нескольких полипептидных субъединиц, имеющих полигенное кодирование. Число генов, детерминирующих структуру V-области этого рецептора (вариабельный участок, ответственный за специфическое распознавание), в незрелой клетке достигает 100. При созревании лимфоцита в результате рекомбинационных перестроек в V-генах, индивидуальных для каждой клетки, образуется бесконечно большое количество вариантов антигенной специфичности рецептора, достигающее $10^{12}$, что сопоставимо с общей численностью популяции Т-лимфоцитов. Формирование В-клеточного рецептора имеет те же закономерности. Биологический смысл феномена чрезвычайно важен: в организме постоянно поддерживается широкий репертуар специфической направленности лимфоидных рецепторов, и клетки готовы в любой момент ответить защитной реакцией на любой возможный антиген.

В такой ситуации закономерно появление Т-лимфоцитов, специфичных для антигенов собственного организма. Однако они должны элиминироваться в тимусе на ранних этапах своего развития. Поэтому различают *первичный* и *вторичный антигенраспознающий репертуар* лимфоидных популяций. Первичный характеризуется набором рецепторных специфичностей, формирующимся при образовании лимфоцитов в костном мозгу индивидуума. Вторичный, или клональный, репертуар является совокупностью вариантов рецептора после отбраковки аутореактивных клонов клеток.

Антигенспецифическая рецепция в лимфоцитах имеет стандартные механизмы реализации. Полученный внеклеточной частью рецептора сигнал от раздражителя (антигена) передается по трансмембранному участку на его внутриклеточную часть, которая уже активирует внутриклеточные ферменты (тирозинкиназу, фосфорилазу и др.).

Для запуска продуктивной реакции лимфоцита необходима агрегация его рецепторов. Кроме того, для стабилизации рецептор-лигандного взаимодействия и восприятия ко-стимулирующего сигнала требуются вспомогательные молекулы.

Среди лимфоцитов встречаются клетки без отличительных признаков Т- и В-лимфоцитов. Они получили название *нулевых клеток*. В костном мозгу на их долю приходится около 50% всех лимфоцитов, а в крови — примерно 5%. Функциональная активность остается неясной.

**В-лимфоциты**. В-лимфоциты — это преимущественно эффекторные иммунокомпетентные клетки, на долю которых приходится около 15% всей численности лимфоцитов. Выделяют две субпопуляции В-лимфоцитов: традиционные В-клетки, не имеющие маркера $CD5^-$, и $CD5^+$ B1-лимфоциты.

При электронной микроскопии $CD5^-$ В-лимфоциты имеют шероховатую поверхность, на ней определяются CD19–22 и некоторые другие. Функцию антигенспецифического рецептора (*BCR*) выполняют особые мембранные формы иммуноглобулинов. Клетки экспрессируют МНС II класса, ко-стимулирующие молекулы CD40, 80, 86, *FcR* к иммунным комплексам и нативным молекулам иммуноглобулина класса G, рецептор к эритроцитам мыши, иммуноцитокинам и др.

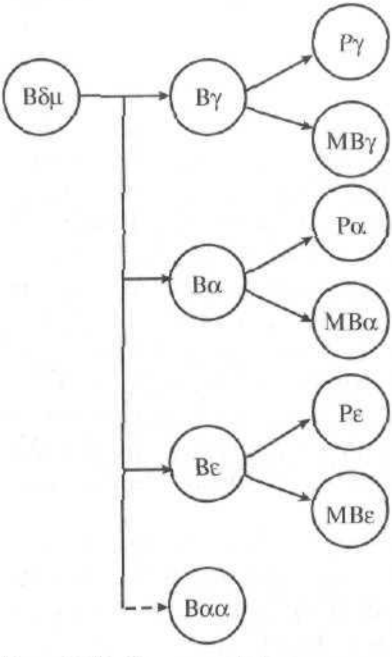



**Рис. 10.5.** Схема дифференцировки В-лимфоцита: Р — плазматическая клетка; МВ — В-лимфоцит иммунологической памяти; Bαα — синтезирует полимерный иммуноглобулин А в слизистых оболочках

Функцией зрелых $CD5^-$ В-лимфоцитов и их потомков (плазмоцитов) является продукция иммуноглобулинов. Кроме того, В-лимфоциты являются профессиональными АПК. Они участвуют в формировании гуморального иммунитета, В-клеточной иммунологической памяти и гиперчувствительности немедленного типа.

Дифференцировка и созревание В-лимфоцитов (рис. 10.5) *происходят сначала в костном* мозге, а затем в периферических органах иммунной системы, куда они отселяются на стадии предшественников. Потомками В-лимфоцитов являются клетки иммунологической памяти и плазматические клетки. Основные морфологические признаки последних — развитый эндоплазматический ретикулум и аппарат Гольджи с большим количеством рибо-

сом. *Плазмоцит имеет короткий период жизни — не более 2—3 сут.*

В1-лимфоциты считают филогенетически наиболее древней ветвью антителопродуцирующих клеток. Предшественники этих клеток рано мигрируют в ткани слизистых оболочек, где автономно от центральных органов иммунной системы поддерживают численность своей популяции. Клетки экспрессируют CD5, синтезируют низкоаффинные IgA и IgM к полисахаридным и липидным антигенам микробов и обеспечивают иммунную защиту слизистых оболочек от условно-патогенных бактерий.

Функциональной активностью В-лимфоцитов управляют молекулярные антигены и иммуноцитокины Т-хелпера, макрофага и других клеток.

**Т-лимфоциты**. *Т-лимфоциты* — это сложная по составу группа клеток, которая происходит от полипотентной стволовой клетки костного мозга, а созревает и дифференцируется в тимусе из предшественников. На долю этих клеток приходится около 75% всей лимфоидной популяции. На электронограмме все Т-лимфоциты имеют гладкую поверхность, их общим маркером являются CD3, а также рецептор к эритроцитам барана. В зависимости от строения антигенного рецептора (*TCR*) и функциональной направленности сообщество Т-лимфоцитов может быть разделено на группы.

Различают два типа *TCR*: αβ и γδ. Первый тип — гетеродимер, который состоит из двух полипептидных цепей — α и β. Он характерен для традиционных Т-лимфоцитов, известных как Т-хелперы и Т-киллеры. Второй обнаруживается на поверхности особой популяции γδТ-лимфоцитов.

Т-лимфоциты функционально также разделяются на две субпопуляции: иммунорегуляторов и эффекторов. Задачу регуляции иммунного ответа выполняют Т-хелперы. Ранее предполагалось существование Т-супрессоров, способных тормозить развитие иммунной реакции (супрессия). Однако до сих пор клетка морфологически не идентифицирована, хотя сам супрессорный эффект существует. Эффекторную функцию осуществляют цитотоксические лимфоциты Т-киллеры.

В организме Т-лимфоциты обеспечивают клеточные формы иммунного ответа (гиперчувствительность замедленного типа, трансплантационный иммунитет и т.д.), определяют силу и продолжительность иммунной реакции. Их созреванием, дифференцировкой и активностью управляют цитокины и макрофаги.

**Т-хелперы**. Т-хелперы или Т-помощники — субпопуляция Т-лимфоцитов, которые выполняют регуляторную функцию. На их долю приходится около 75% всей популяции Т-лимфоцитов. Они несут маркер CD4, а также αβ*TCR*, с помощью которого анализируют природу антигена, представляемую им АПК.

Рецепция антигена Т-хелпером, т.е. анализ его чужеродности, — весьма сложный процесс, требующий высокой точности. *Ему способствуют (рис. 10.6) молекула CD3 (комплексируется с TCR)*, ко-рецепторные молекулы CD4 (имеют сродство к молекулярному комплексу МНС II класса), молекулы адгезии (стабилизируют межклеточный контакт), рецепторы (взаимодействуют с ко-стимулирующими факторами АПК — CD28, 40L).

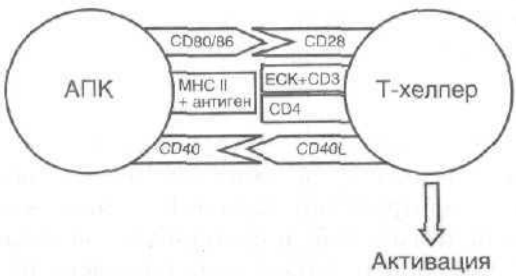



***Рис. 10.6.*** *Схема активации Т-хелпера (пояснение в тексте)*

Активированный Т-хелпер продуцирует широкий спектр иммуноцитокитов, при помощи которых он управляет биологической активностью множества клеток, вовлеченных в иммунный ответ.

*Популяция Т-хелперов гетерогенна.* Активированный $CD4^+$ Т-лимфоцит ($T_0$-хелпер) дифференцируется в одного из своих потомков: $T_1$- или $T_2$-хелпер (рис. 10.7). Эта дифференцировка является альтернативной и направляемой цитокинами. $T_1$- или $T_2$-хелперы различаются лишь функционально по спектру продуцируемых цитокинов.

$T_1$-хелпер образует ИЛ-2, 3, γ-ИФН, ФНО и др., необходимые для развития клеточного иммунного ответа, гиперчувствительности замедленного типа, иммунного воспаления. Формирование этой клетки определяют активированный макрофаг, естественный и Т-киллеры, синтезирующие ИЛ-12 и γ-ИФН.

$T_2$-хелпер продуцирует ИЛ-4, 5, 6, 9, 10, 13 и др., которые *поддерживают гуморальный иммунный ответ*, а также гиперчув-

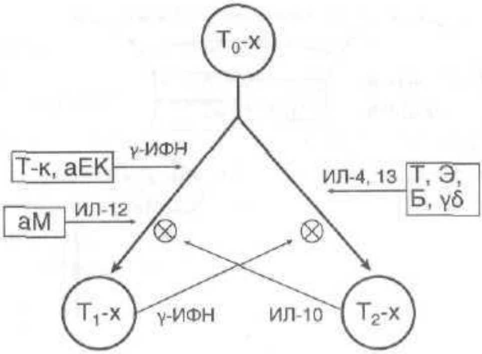



**Рис. 10.7.** Схема дифференцировки Т-хелпера: Т-х — Т-хелпер; аМ — активированный макрофаг; Т-к — Т-киллер; аЕК — активированный естественный киллер; Э — эозинофил; Б — базофил; Т — тучная клетка; γδТ — γδТ-лимфоцит

ствительность немедленного типа. Дифференцировку в сторону $T_2$-хелпера потенцируют γδТ-клетки, базофилы, тучные клетки и эозинофилы, синтезирующие ИЛ-4 и 13.

В организме поддерживается баланс $T_1$-/$T_2$-хелперов, который необходим для развития адекватного иммунного ответа. $T_1$- и $T_2$-хелперы являются антагонистами и тормозят развитие друг друга. Установлено, что в организме новорожденных преобладают $T_2$-хелперы. Нарушение заселения желудочно-кишечного тракта нормальной микрофлорой тормозит развитие субпопуляции $T_1$-хелперов и ведет к аллергизации организма.

**Т-киллеры (цитотоксические Т-лимфоциты).** Т-киллер — субпопуляция Т-лимфоцитов-эффекторов, на долю которых приходится примерно 25% всех Т-лимфоцитов. На поверхности Т-киллера определяются молекулы CD8, а также αβ*TCR* к антигену в комплексе с МНС I класса, по которому «свои» клетки отличаются от «чужих». В рецепции принимают участие молекула CD3, комплексирующая с *TCR*, и ко-рецепторные молекулы CD8, тропные к МНС I класса (рис. 10.8).

Т-киллер анализирует клетки собственного организма в поисках чужеродного МНС I класса. Клетки мутантные, пораженные вирусом, или аллогенного трансплантата несут на своей поверхности такие признаки генетической чужеродности, поэтому являются мишенью Т-киллера.

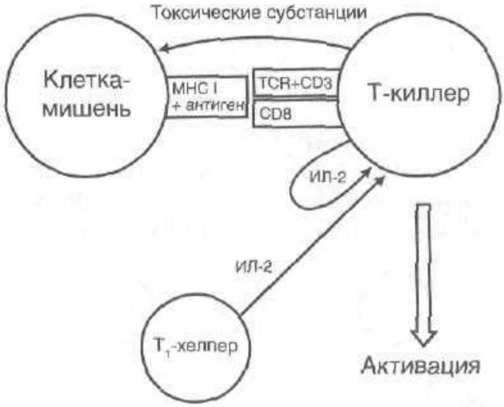



**Рис. 10.8.** Схема активации Т-киллера (пояснения в тексте)

Т-киллер устраняет клетки-мишени путем антителонезависимой клеточно-опосредованной цитотоксичности (АНКЦТ) (см. раздел 11.3.2), для чего синтезирует ряд токсичных субстанций: перфорин, гранзимы и гранулизин. *Перфорин* — токсичный белок, который синтезируют цитотоксические лимфоциты–Т-киллеры и естественные киллеры. Обладает неспецифическим свойством. Вырабатывается только зрелыми активированными клетками. Перфорин образуется в виде растворимого белка-предшественника и накапливается в цитоплазме в гранулах, которые сосредоточиваются около *TCR*, связавшегося с клеткой-мишенью для обеспечения локального, адресного поражения клетки-мишени. Содержимое гранул высвобождается в узкую синаптическую щель, образованную тесным контактом цитотоксического лимфоцита и клетки-мишени. За счет гидрофобных участков перфорин встраивается в цитоплазматическую мембрану клетки-мишени, где в присутствии ионов $Ca^{2+}$ полимеризуется в трансмембранную пору диаметром 16 нм. Образовавшийся канал может вызвать осмотический лизис клетки-мишени (некроз) и/или обеспечить проникновение в нее гранзимов и гранулизина.

*Гранзимы* — это обобщающее название сериновых протеаз, синтезируемых зрелыми активированными цитотоксическими лимфоцитами. Различают три типа гранзимов: А, В и С. После синтеза гранзимы накапливаются в гранулах подобно перфорину и вместе

с ним выделяются из клетки в синаптическую щель. В клетку-мишень проникают через поры, образованные перфорином. Мишенью для гранзимов являются внутриклеточные ферменты, инициирующие апоптоз и обладающие широкой нуклеазной активностью, в том числе способностью разрушать нуклеиновые кислоты внутриклеточных паразитов. Таким образом, гранзимы индуцируют гибель клетки путем апоптоза и санацию организма от зараженных клеток.

*Гранулизин* — эффекторная молекула с ферментативной активностью, синтезируемая цитотоксическими лимфоцитами. Способен запускать в клетках-мишенях апоптоз, повреждая мембрану их митохондрий.

Т-киллер обладает огромным биологическим потенциалом — его называют серийным убийцем. За короткий срок он может уничтожить несколько клеток-мишеней, затрачивая на каждую около 5 мин. Эффекторную функцию Т-киллера стимулирует $Т_1$-хелпер, хотя в ряде случаев его помощь не требуется. Помимо эффекторной функции, активированный Т-киллер синтезирует γ-ИФН и ФНО, стимулирующие макрофаг и потенцирующие иммунное воспаление.

**γδТ-лимфоциты**. Среди Т-лимфоцитов существует малочисленная популяция клеток с фенотипом $CD4^-CD8^-$, которые несут на своей поверхности особый *TCR* γδ-типа — γδТ-лимфоциты. Локализуются в эпидермисе и слизистой оболочке желудочно-кишечного тракта. Их общая численность не превышает 1% общего пула Т-лимфоцитов, однако в покровных тканях она может достигать 10%.

γδТ-лимфоциты происходят из автономного ростка стволовых клеток, мигрировавших в покровные ткани на ранних этапах эмбриогенеза. В созревании минуют тимус. Активируются клетками поврежденного эпителия желудочно-кишечного тракта и эпидермиса, размножение усиливается ИЛ-7.

Антигенный рецептор γδТ-лимфоцита сходен с *BCR*, его активный центр непосредственно связывается с эпитопом антигена без его предварительного процессинга и участия МНС. Антигенные детерминанты могут быть представлены, например, молекулами CD1. γδTCR ориентированы на распознавание некоторых широко распространенных микробных антигенов (липопротеинов, белков теплового шока, бактериальных суперантигенов и др.).

γδТ-лимфоциты могут быть как эффекторными, цитотоксическими клетками (принимают участие в удалении патогенов на ранних этапах антиинфекционной защиты), так и регуляторами иммунореактивности. Синтезируют цитокины, активирующие местный иммунитет и локальную воспалительную реакцию, в том числе усиливают образование $Т_2$-хелперов. Кроме того, γδ-клетки продуцируют *ИЛ-7* и управляют численностью собственной популяции.

*10.2.1.3.2. Другие клетки иммунной системы*

Помимо лимфоцитов, в развитии иммунного ответа участвует множество различных клеточных популяций, относящихся в основном к миелоидному ростку. Особого внимания заслуживают естественные киллеры, гранулоциты, тучные и дендритные клетки.

*Естественные* или *нормальные киллеры, NK-клетки* (от англ. *Natural killer*) были изначально описаны как большие гранулярные лимфоциты, способные распознать в организме некоторые виды раково-трансформированных клеток и уничтожить их без предварительной подготовки, что обусловило название клеток.

Сейчас установлено, что естественные киллеры (ЕК) имеют морфологию малых лимфоцитов, на долю которых приходится около 15% всех лимфоцитов. Они образуются из ППСК костного мозга, мигрируют с кровотоком, но отсутствуют в лимфе. Обнаруживаются в печени, селезенке, слизистых оболочках, матке. По маркерам, местам типичной локализации и эффекторным механизмам выделяют две субпопуляции ЕК: кровяную и тканевую. ЕК — главный защитник макроорганизма от внутриклеточных паразитов. Он срабатывает задолго до активации адаптивного иммунитета. Вместе с тем биологические возможности ЕК весьма ограничены.

*Кровяные* ЕК — это активно циркулирующие в кровотоке клетки. Обнаруживаются в красной пульпе селезенки. Несут на себе маркер $CD16^+CD56^{мало}$, *FcR* к иммуноглобулину класса G, связанному в иммунный комплекс, и рецептор к МНС I класса. При активации синтезируют, накапливая в гранулах, перфорин, гранзимы и гранулизин. Эффекторная функция кровяных ЕК в отношении меченных иммуноглобулинами клеток реализуется в АЗКЦТ (см. раздел 11.3.1). Мишенями являются клетки, инфицированные внутриклеточными паразитами (бактерии, вирусы, простейшие), аллогенные клетки трансплантата и некоторые опухоли.

Рецептор к МНС I класса анализирует плотность его экспрессии на мембране клетки. Дефицит этих молекул, наблюдающийся при раковой трансфорации клеток, также потенцирует цитотоксичность ЕК.

*Тканевые* ЕК ведут более оседлый образ жизни и обнаруживаются в большом количестве в печени и децидаульной оболочке беременной матки. Несут маркер $CD16^{-}CD56^{много}$ и много *Fas*-лиганда. Реализуют АНКЦТ (см. раздел 11.3.2). Клетками-мишенями являются лимфоциты, активированные, например, пищевыми антигенами или аллоантигенами плода и экспрессирующие *Fas*.

Помимо цитотоксических функций, ЕК вырабатывают цитокины (ИЛ-5, 8, γ-ИФН, ФНО, гранулоцит-моноцит-колониестимулирующий фактор—ГМ-КСФ и др.), активирует макрофагально-фагоцитарное звено, развитие иммунного ответа и иммунного воспаления. Эффекторная функция ЕК усиливается цитокинами (ИЛ-2, 4, 10, 12, γ-ИФН и др.).

*Фагоциты* (см. раздел 9.2.3.1) — самая многочисленная морфологически гетерогенная фракция иммунокомпетентных клеток. Выполняют регуляторную и эффекторную функции. Вырабатывают иммуноцитокины, ферменты, ион-радикалы и другие биологически активные вещества, осуществляют вне- и внутриклеточный киллинг и фагоцитоз. Кроме того, макрофаги являются АПК — обеспечивают процессинг и презентацию антигена Т-хелперам.

*Эозинофилы* — гранулярные лейкоциты крови. Содержатся в крови, рыхлой соединительной ткани, в большом количестве накапливаются в очагах местного воспаления, вызванного гельминтами, и обеспечивают АЗКЦТ.

Эозинофилы несут на мембране низкоаффинные *FcR* к IgA или IgE, распознающие паразитов, отмеченных такими антителами. Активированная клетка выделяет ферменты (эозинофильная пероксидаза и коллагеназа) и белковые токсины (главный щелочной протеин, эозинофильный катионный белок и нейротоксин), губительно действующие на гельминты.

Эозинофилы также синтезируют цитокины (ИЛ-3, 5, 8, ГМ-КСФ и др.), стимулирующие клеточное звено иммунитета и образование $T_2$-хелпера, и липидные медиаторы (лейкотриены, *тромбоцитактивирующий фактор и др.*), запускающие воспалительную реакцию в месте внедрения гельминта.

*Тучные клетки* — немигрирующие морфологические элементы неясного происхождения, располагаются оседло вдоль барьерных тканей (*lamina propria* слизистых оболочек, в подкожной соединительной ткани) и в соединительной ткани кровеносных сосудов. По набору синтезируемых биологически активных соединений и локализации выделяют две разновидности тучных клеток — клетки *слизистых оболочек* и *соединительной ткани*.

*Базофилы* — гранулоциты, происходящие из костно-мозговой стволовой ППСК и родственные эозинофилам. Их дифференцировка альтернативно определяется цитокинами. Постоянно мигрируют с кровотоком, привлекаются в очаг воспаления анафилотоксинами (C3a, C4a и C5a) и задерживаются там с помощью соответствующих хоминговых рецепторов.

Базофил и тучная клетка синтезируют сходный набор биологически активных веществ. Вырабатывают, накапливая в гранулах, вазоактивные амины (гистамин у человека и серотонин у грызунов), сульфатированные глюкозаминогликаны (хондроитинсульфат, гепарин), ферменты (сериновые протеазы и др.), а также цитокин α-ФНО. Напрямую выделяют в межклеточное пространство лейкотриены (С4, Д4, Е4), простагландины (*PGD*2, *PGE*2), цитокины (ИЛ-3, 4, 5, 13 и ГМ-КСФ) и фактор активации тромбоцитов.

На поверхности базофил и тучная клетка несут высокоаффинный *FcR* к IgE и G4. Образованный рецепторный комплекс специфически взаимодействует с эпитопом антигена/аллергена. Экспрессируют также *FcR* к IgG в составе иммунного комплекса. Базофил и тучная клетка активируются аллергенами, анафилотоксинами, медиаторами активированных нейтрофилов, норадреналином, ингибируются иммунными комплексами.

Связывание аллергена с рецепторным комплексом вызывает дегрануляцию базофила и тучной клетки — залповый выброс биологически активных соединений, содержащихся в гранулах, в межклеточное пространство, которые вызывают развитие гиперчувствительности немедленного типа (аллергической реакции I типа).

Базофил и тучная клетка направляют дифференцировку Т-хелперов в сторону $T_2$-субпопуляции и усиливают эозинофилогенез.

*Дендритные клетки* — отростчатые клетки костно-мозгового происхождения. Локализуются в лимфоидных органах и барьерных тканях. Экспрессируют на своей поверхности МНС II класса и ко-стимулирующие факторы (CD40, 80, 86). Способны погло-

щать путем эндоцитоза, перерабатывать (процессировать) и представлять (презентировать) антиген Т-хелперам в комплексе с MHC II класса. Является наиболее активной АПК. Из числа дендритных клеток хорошо известны клетки Лангерганса (в эпидермисе), интердигитальные клетки (в лимфатических узлах) и дендритные клетки тимуса.

### 10.2.2. Организация функционирования иммунной системы

Иммунная система имеет сложную организацию — для осуществления специфической функции задействовано множество различных клеточных популяций и растворимых факторов иммунитета. Клетки постоянно циркулируют в организме, погибают в процессе жизнедеятельности и воспроизводятся.

В зависимости от конкретной потребности специфическая функция иммунной системы может быть активирована либо подавлена (супрессирована). Однако любое реагирование иммунной системы осуществляется только при постоянном взаимодействии практически всех типов ее клеток, т.е. в условиях межклеточной кооперации. Раздражителем (активирующим сигналом) является антиген. В развитии любого иммунного реагирования прослеживается каскад последовательно сменяющихся этапов.

#### *10.2.2.1. Взаимодействие клеток иммунной системы*

Необходимым условием функционирования иммунной системы является *тесная межклеточная кооперация*, основу которой составляет рецептор-лигандное взаимодействие. Для связи между собой клетки используют различные дистантные растворимые факторы и прямой контакт.

Синтез растворимых факторов является одним из универсальных способов коммутации клеток между собой. К таковым относятся цитокины, которых в настоящее время известно более 25. Они представляют собой гетерогенное семейство разнообразных по структуре и функции биологически активных молекул, имеющих ряд общих свойств:

- как правило, цитокины не депонируются в клетке, а синтезируются после соответствующего стимула;
- для восприятия цитокинового сигнала клетка экспрессирует соответствующий рецептор, который может взаимодействовать с несколькими различными цитокинами;

- цитокины синтезируются клетками разных ростков, уровней и направлений дифференцировки;
- субпопуляции клеток иммунной системы различаются по спектру синтезируемых цитокинов и их рецепторов;
- цитокины обладают универсальностью, множественностью эффектов и синергизмом;
- цитокины могут воздействовать как на рядом расположенную клетку (*паракринная регуляция*), так и на сам продуцент (аутокринная регуляция);
- цитокиновая регуляция носит каскадный характер: активация клетки одним цитокином вызывает синтез другого;
- в подавляющем большинстве это короткодистантные медиаторы — их эффекты проявляются на месте выработки. Вместе с тем ряд провоспалительных цитокинов (ИЛ-1, 6, α-ФНО и др.) могут оказывать системное действие.

Цитокины различаются по ведущей *функциональной* направленности:

- медиаторы доиммунного воспаления (ИЛ-1, 6,12, α-ФНО и др);
- медиаторы иммунного воспаления (ИЛ-5, 9, 10, γ-ИФН и др.);
- стимуляторы пролиферации и дифференцировки лимфоцитов (ИЛ-2, 4, 13, трансформирующий фактор роста — β-ТФР и др.);
- факторы роста клеток, или колониестимулирующие факторы (ИЛ-3, 7, ГМ-КСФ и др.);
- хемокины, или клеточные хемоаттрактанты (ИЛ-8 и др.).

Краткая характеристика некоторых цитокинов приведена в табл. 10.3.

*Прямое межклеточное взаимодействие* основано на рецепции структур, экспрессированных на мембране клетки-оппонента. Для этого требуется достаточно продолжительный и стабильный контакт клеток. Такой способ коммутации используют Т-хелперы и Т-киллеры при анализе чужеродности презентированных структур. Механизм действия ко-стимулирующих факторов (пары CD40–CD40-лиганд, CD28–CD80, 86) также требует непосредственного контакта.

### *10.2.2.2. Активация иммунной системы*

Активация иммунной системы подразумевает развитие продуктивной иммунной реакции в ответ на антигенное раздражение

Таблица 10.3. Характеристика основных цитокинов

| Цитокин | Размер молекулы (аминокислотных остатков) | Клетка-продуцент | Рецептор | Биологический эффект |
|---|---|---|---|---|
| ИЛ-1 (β) | 153 | Макрофаг | CD121 | *Локальный эффект*:<br>активация Т-лимфоцитов и макрофагов<br>*Системный эффект*:<br>развитие симптомов септического шока (лихорадка и пр.) |
| ИЛ-2 | 133 | Активированный $T_1$-хелпер | CD25, 122, 132 | Потенцирует выживание клеток<br>Стимулирует пролиферацию Т- и В-лимфоцитов и естественных киллеров |
| ИЛ-3 | 133 | Т-лимфоцит | CD123 | Мультиколониестимулирующий фактор |
| ИЛ-4 | 129 | Т-лимфоцит, естественный киллер, тучная клетка | CD124, 132 | Направляет дифференцировку Т0-хелпера в сторону $T_2$-клетки<br>Активация В-лимфоцитов<br>Переключение синтеза иммуноглобулинов на класс Е<br>Противовоспалительное действие |
| ИЛ-5 | 115 | $T_2$-хелпер, тучная клетка | CD125 | Активирует эозинофилы<br>Стимулирует синтез иммуноглобулина класса Е |
| ИЛ-6 | 184 | Т-лимфоцит, макрофаг | CD126, 130 | *Локальный эффект*:<br>стимуляция пролиферации и дифференцировки Т- и В-лимфоцитов;<br>усиление биосинтеза иммуноглобулина класса А<br>*Системный эффект*:<br>индукция лихорадки;<br>стимуляция биосинтеза в печени белков острой фазы |

*Продолжение табл. 10.3*

| Цитокин | Размер молекулы (аминокислотных остатков) | Клетка-продуцент | Рецептор | Биологический эффект |
|---|---|---|---|---|
| ИЛ-7 | 152 | Клетки костного мозга, γδТ-лимфоцит | CD127, 132 | Поддерживает размножение преТ-, преВ- и γδТ-лимфоцитов |
| ИЛ-9 | 125 | $T_2$-хелпер | CD132 | Активация тучных клеток |
| ИЛ-10 | 160 | $T_2$-хелпер, макрофаг, В-лимфоцит | IL-10R | Стимулирует переключение синтеза иммуноглобулинов на класс G4<br>Мощный ингибитор активности макрофага и Т-киллера |
| ИЛ-11 | 178 | Фибробласт | CD130 | Синергист ИЛ-3 |
| ИЛ-12 | 503 | Макрофаг, В-лимфоцит | CD132 | Направляет дифференцировку Т0-хелпера в сторону $T_1$-клетки<br>Стимулирует созревание Т-киллеров<br>Активирует естественные киллеры |
| ИЛ-13 | 132 | $T_2$-хелпер | CD132 | Направляет дифференцировку Т0-хелпера в сторону $T_2$-клетки<br>Активация В-лимфоцитов<br>Стимулирует переключение синтеза иммуноглобулинов на класс Е<br>Противовоспалительное действие |
| ИЛ-15 | 114 | Т-лимфоцит | CD122, 132 | Стимулирует пролиферацию Т-лимфоцитов и естественных киллеров |





*Продолжение табл. 10.3*

| Цитокин | Размер молекулы (аминокислотных остатков) | Клетка-продуцент | Рецептор | Биологический эффект |
|---|---|---|---|---|
| ИЛ-16 | 130 | Т-лимфоцит, тучная клетка, эозинофил | CD4 | Хемоаттрактант для Т-хелперов, моноцитов, эозинофилов<br>Блокирует апоптоз в Т-лимфоцитах |
| ИЛ-17 | 150 | $CD4^+$ Т-лимфоциты иммунной памяти | IL-17R | Стимулирует эпителиальные, эндотелиальные клетки и фибробласты к продукции цитокинов |
| ИЛ-18 | 157 | Активированный макрофаг | IL-1*Rrp* (гомолог *CD121*) | Индукция синтеза γ-ИФН Т-лимфоцитами и естественными киллерами<br>Потенцирует дифференцировку $T_1$-хелпера |
| γ-ИФН | 143 | $T_1$-хелпер, Т-киллер, естественный киллер | CD119 | Активирует макрофаг и естественный киллер<br>Индуцирует экспрессию на клетках МНС I и II классов<br>Потенцирует образование $T_1$-хелпера<br>*Стимулирует в В-лимфоцитах переключение* биосинтеза изотипов иммуноглобулинов<br>Обладает противовирусным действием |
| ГМ-КСФ | 127 | Т-лимфоцит, макрофаг | CD116 | Поддержка ростка миелопоэза в костном мозгу |
| β-ТФР | 112 | *Активированные* Т-лимфоциты и моноциты | β-*TGF*-R | *Мощный иммуносупрессор: ингибирует акти*вацию Т-киллеров, макрофагов и гранулоцитов и пролиферацию лимфоцитов<br>Стимулирует ангиогенез |

*Окончание табл. 10.3*

| Цитокин | Размер молекулы (аминокислотных остатков) | Клетка-продуцент | Рецептор | Биологический эффект |
|---|---|---|---|---|
| α-ФНО | 157 | Активированные макрофаг, нейтрофил, естественный киллер и тучная клетка | CD120 | *Локальный эффект*:<br>создает очаг местного воспаления в покровных тканях при инфицировании;<br>активирует биосинтез ИЛ-1, 6;<br>стимулирует синтез белков острой фазы<br>*Системный эффект*:<br>индуцирует симптомы септического шока (лихорадка, коллапс, ДВС-синдром и др.) |
| МИФ | 115 | Т-лимфоцит | *MIF*-R | Тормозит миграцию моноцитов из очага воспаления<br>Стимулирует дифференцировку моноцита в макрофаг<br>Активирует макрофаг |

Примечание. МИФ — миграцию ингибирующий фактор.

и появление продуктов деструкции тканей макроорганизма. Это сложный многоступенчатый процесс, требующий продолжительного времени для своей индукции — около 4 сут. Критическим событием является невозможность элиминации антигена факторами врожденного иммунитета в течение указанного срока.

Пусковым механизмом адаптивного иммунитета является распознавание «свой—чужой», которое осуществляют Т-лимфоциты при помощи своих прямых иммунорецепторов — *TCR*. В случае установления чужеродности биоорганической молекулы включается второй этап реагирования — запускается интенсивное тиражирование клона высокоспецифичных для антигена лимфоцитов-эффекторов, способных прервать антигенную интервенцию. Это явление получило название *«экспансия клона»*. Параллельно, но несколько позже пролиферации стимулируются дифференцировка иммунных лимфоцитов и формирование из него клеток иммунологической памяти, гарантирующих выживание в будущем.

*Таким образом, продуктивная активация иммунной системы* связана с размножением и дифференцировкой антигенореактивных клонов иммунокомпетентных клеток. Антигену в этом процессе отведена роль индуктора и фактора клональной селекции. Механизмы основных этапов активации иммунной системы рассмотрены ниже.

*Активация Т-хелпера.* Процесс (см. рис. 10.6) осуществляется *при непосредственном участии* АПК (дендритные клетки, В-лимфоциты и макрофаги). После эндоцитоза и процессинга антигена во внутриклеточных везикулах АПК встраивает образовавшийся олигопептид в молекулу МНС II класса и выставляет полученный комплекс на наружной мембране. На поверхности АПК также экспрессируются ко-стимулирующие факторы — молекулы CD40, 80, 86, мощным индуктором которых являются продукты разрушения *покровных тканей на этапе доиммунного воспаления.*

Т-хелпер при помощи молекул адгезии прочно соединяется с поверхностью АПК. Иммунорецептор Т-хелпера совместно с молекулой CD3 при поддержке ко-рецепторной молекулы CD4 взаимодействует с комплексом антиген—МНС II класса и анализирует чужеродность его структуры. Продуктивность рецепции зависит от ко-стимулирующих воздействий в парах CD28—CD80/86 и CD40-*лиганд—CD40.*

В случае признания чужеродности комплекса антиген—МНС II класса (точнее, «не своего») Т-хелпер активируется. Он экспресси-

рует рецептор к ИЛ-2 и начинает синтезировать ИЛ-2 и другие цитокины. Итогом активации Т-хелпера являются его размножение и дифференцировка в одного из своих потомков — $T_1$- или $T_2$-хелпер (см. рис. 10.2). Любое изменение условий рецепции прекращает активацию Т-хелпера и может индуцировать в нем апоптоз.

*Активация В-лимфоцита.* Для активации В-лимфоцита (рис. 10.9) необходима суммация трех последовательных сигналов. Первый сигнал — результат взаимодействия молекулы антигена со специфичным для него *BCR*, второй — интерлейкиновый стимул активированного Т-хелпера и третий — результат взаимодействия ко-стимулирующих молекул CD40 с CD40-лигандом.

Активация инициирует размножение и дифференцировку специфичного для конкретного антигена В-лимфоцита (см. рис. 10.2). В итоге в пределах зародышевых (герминативных) центров лимфоидных фолликулов появляется клон специфических антителопродуцентов. Дифференцировка позволяет переключить биосинтез иммуноглобулинов с классов M и D на более экономные: G, A или E (редко), повысить аффинность синтезируемых антител и образовать В-клетки иммунологической памяти или плазматические клетки.

Активация В-лимфоцита — весьма тонкий процесс. Отсутствие хотя бы одного из стимулов (нарушение межклеточной кооперации, неспецифичность рецептора В-лимфоцита или элиминация антигена) блокирует развитие антительного иммунного ответа.

*Активация Т-киллера.* Для исполнения надзорной функции Т-киллер вступает в тесный и прочный контакт с потенциальной

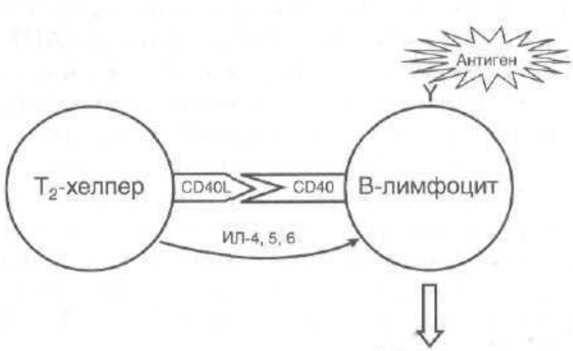



**Рис. 10.9.** Схема активации В-лимфоцита (пояснения в тексте)

клеткой-мишенью, используя молекулы адгезии (см. рис. 10.8). Затем иммунорецептор Т-киллера (αβ*TCR*) совместно с молекулой CD3 при поддержке ко-рецепторной молекулы CD8 взаимодействует с антигенным комплексом МНС I класса и анализирует его структуру. Обнаружение отклонений в пользу аллогенности активирует Т-киллер к экспрессии рецептора к ИЛ-2 и синтезу ИЛ-2 и высвобождение эффекторных молекул (перфорин, гранзимы, гранулизин) из цитоплазматических гранул в синаптическую щель межклеточного контакта.

Для адекватного развития клеточной формы иммунного ответа требуются активизирующие стимулы со стороны $T_1$-хелпера. Т-киллер может функционировать автономно, самостоятельно инициируя и поддерживая клонообразование за счет аутокринной стимуляции ИЛ-2. Однако это свойство реализуется редко.

*10.2.2.3. Супрессия иммунного ответа*

Супрессия или подавление иммунного ответа является физиологической реакцией организма, которая в норме завершает иммунный ответ и направлена на торможение экспансии антигенспецифических клонов лимфоцитов. В отличие от иммунологической толерантности, супрессии подвергается уже инициированное иммунное реагирование. Различают три механизма иммуносупрессии: уничтожение клонов иммунокомпетентных клеток, торможение активности иммунокомпетентных клеток, элиминация антигенного стимула.

Устранить иммунокомпетентные клетки можно путем апоптоза. При этом элиминации подвергаются следующие группы клеток:

- терминально дифференцированные лимфоциты, завершившие свою биологическую программу;
- активированные лимфоциты, не получившие антигенного стимула;
- «изношенные» лимфоциты;
- аутореактивные клетки.

Естественными факторами, инициирующими апоптоз, яляются глюкокортикоидные гормоны, *Fas*-лиганд, α-ФНО и другие иммуноцитокины, гранзимы и гранулизин. Апоптотическое уничтожение клеток-мишеней могут активировать Т-киллеры, ЕК с фенотипом $CD16^{-}CD56^{много}$ и $T_1$-хелперы.

Помимо апоптоза возможен антителозависимый лимфоцитолиз. Например, с медицинской целью применяют антилимфоцитарную

сыворотку, которая в присутствии комплемента вызывает лизис лимфоцитов. Устранить лимфоидную популяцию возможно также воздействием ионизирующего излучения или цитостатиков.

Функциональная активность иммунокомпетентных клеток может быть ингибирована растворимыми факторами их конкурентов или потомков. Ведущая роль принадлежит иммуноцитокинам с *множественными эффектами. Известно,* например, что $T_2$-хелперы, γδT-лимфоциты и тучные клетки при помощи ИЛ-4, 13 препятствуют дифференцировке Т0-хелпера в $T_1$-клетку. Последний, в свою очередь, может блокировать образование $T_2$-хелпера, синтезируя γ-ИФН. Пролиферацию Т- и В-лимфоцитов ограничивает β-ТФР, который продуцируют терминально дифференцированные Т-хелперы. Уже упомянутые продукты $T_2$-хелпера (ИЛ-4, 13 и β-ТФР) подавляют биологическую активность макрофагов.

Супрессия гуморального звена иммунитета может быть вызвана иммуноглобулинами. Избыточные концентрации иммуноглобулина класса G, связываясь со специальными рецепторами на мембране В-лимфоцита, тормозят биологическую активность клетки и ее способность дифференцироваться в плазмоцит.

Устранение из организма антигена в природе наблюдается при полном освобождении организма от патогена при развитии стерильного иммунитета. В клинической практике эффект достигается очищением организма плазмо- или лимфосорбцией, а также нейтрализацией антигена антителами, специфичными для высокоиммуногенных эпитопов.

*10.2.2.4. Возрастные изменения иммунной системы*

В развитии иммунной системы четко прослеживаются два этапа. Первый, *антигеннезависимый*, который начинается с эмбрионального периода развития и частично продолжается всю жизнь. В течение этого периода образуются стволовые клетки и разнообразные антигенспецифические клоны лимфоцитов. Предшественники γδT- и В1-лимфоцитов мигрируют в покровные ткани и формируют автономные лимфоидные ростки.

Второй этап, *антигензависимый,* продолжается с момента рождения особи до ее гибели. В этот период идет «ознакомление» иммунной системы с многообразием окружающих нас антигенов. По мере накопления биологического опыта, т.е. количества и качества продуктивных контактов с антигенами, происходят селекция

и тиражирование отдельных клонов иммунокомпетентных клеток. Особенно интенсивная экспансия клонов характерна для детского возраста. В течение первых 5 лет жизни иммунной системе ребенка приходится усваивать примерно 90% биологической информации. Еще 9% воспринимается до наступления пубертата, на взрослое состояние остается лишь около 1%.

Иммунной системе ребенка приходится справляться с чудовищными нагрузками, которые в основном падают на гуморальное звено иммунитета. В местах с повышенной плотностью населения и частыми межиндивидуальными контактами (крупные города) создаются условия для длительной персистенции высокой концентрации разнообразных патогенов. Поэтому дети в мегаполисах часто болеют. Однако создается впечатление о тотальном иммунодефиците, порожденном крайним экологическим неблагополучием. Между тем эволюционно заложенные механизмы иммунной защиты позволяют организму ребенка успешно справиться с трудными естественными испытаниями на жизнеспособность и адекватно отреагировать на вакцинопрофилактику.

С возрастом иммунная система меняет свою структуру. В организме взрослого до 50% всего лимфоидного пула представлено клонами клеток, прошедших антигенную стимуляцию. Накопленный иммунной системой биологический опыт проявляется образованием узкой «библиотеки» жизненно важных (актуальных) клонов лимфоцитов, специфичных для основных патогенов. Благодаря долгоживучести клеток иммунологической памяти актуальные клоны со временем становятся самодостаточными. Они приобретают способность к самоподдержанию и независимость от центральных органов иммунной системы. Функциональная нагрузка на тимус снижается, что проявляется его возрастной инволюцией. Тем не менее в организме сохраняется широкий набор невостребованных «наивных» клеток. Они способны отреагировать на любую новую антигенную агрессию.

Структура популяции Т-лимфоцитов также претерпевает возрастные изменения. Установлено, что в организме новорожденных преобладают $T_2$-хелперы, необходимые для развития антительной защиты. Однако со временем перед организмом все острее встает проблема внутриклеточного паразитизма, различных инвазий, мутаций, что требует надежного и хорошо организованного иммунологического надзора за морфогенетическим постоянством кле-

точных элементов организма. Поэтому после рождения начинает усиленно развиваться система адаптивного клеточного иммунитета, а вместе с ним образование клонов $T_1$-хелперов и Т-киллеров. Отмечено, что нарушение постнатальной колонизации желудочно-кишечного тракта нормальной флорой тормозит процесс адекватного формирования популяции $T_1$-хелперов в пользу $T_2$-клеток. Избыточная активность последних оборачивается аллергизацией детских организмов.

Продуктивный иммунный ответ после своего завершения (нейтрализации и элиминации антигена из организма) также сопровождается изменениями клональной структуры антигенореактивных лимфоцитов. При отсутствии активирующих стимулов клон инволюционирует. Невостребованные клетки со временем погибают от старости или индукции апоптоза, причем этот процесс начинается с более дифференцированных лимфоцитов-эффекторов. Численность клона постепенно снижается и проявляется постепенным угасанием иммунного ответа. Однако в организме длительно персистируют клетки иммунологической памяти.

Старческий период жизни характеризуется доминированием *в иммунной системе актуальных клонов антигенспецифических* лимфоцитов в сочетании с нарастающей иммунодепрессией и снижением общей реактивности. Инфекции, вызванные даже условно-патогенными микробами, зачастую принимают затяжной или угрожающий характер. Клеточный иммунитет также теряет эффективность, постепенно нарастает объем злокачественно трансформированных клеток. Поэтому у пожилых людей часто встречаются новообразования.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

**А.** Отметьте эффекторные клетки иммунной системы:
1. Дендритные клетки.
2. В-лимфоциты.
3. Т-хелперы.
4. Т-киллеры.

**Б.** Отметьте АПК:
1. Дендритные клетки.
2. В-лимфоциты.
3. Макрофаги.
4. Т-хелперы.

В. Отметьте клетки, на которых экспрессируется рецептор 2-го класса МНС:
1. Т-киллеры.
2. Дендритные клетки.
3. Макрофаги.
4. В-лимфоциты.

Г. Отметьте маркеры В-лимфоцитов:
1. МНС 2-го класса.
2. CD40.
3. CD80.
4. CD28.

Д. Отметьте рецепторные молекулы Т-хелперов:
1. CD4.
2. CD3.
3. CD28.
4. CD40L.

Е. Назовите клетки и медиаторы, принимающие участие в формировании $T_1$-хелперов:
1. ИЛ-12.
2. Т-киллеры.
3. γ-Интерферон.
4. Активированный макрофаг.
5. Тучная клетка.

Ж. Назовите клетки и медиаторы, принимающие участие в формировании $T_2$-хелперов:
1. Базофилы.
2. Т-киллеры.
3. Тучные клетки.
4. ИЛ-4.
5. ФНО.

З. Назовите рецептор-лигазную пару, необходимую для ко-стимуляции Т-хелперов АПК. Без этой ко-стимуляции представление антигена Т-хелперу может привести к его функциональной инактивации:
1. CD80/CD28.
2. МНС класс2/CD4.
3. МНС класс1/CD8.
4. МНС класс2/*TCR*.

**И.** *Назовите рецептор-лигазную пару, необходимую для стимуляции Т-киллера (CD8):*

1. MHC класс 2/CD4.
2. MHC класс 1/CD8.
3. CD40/CD40L.
4. CD80/CD28.

**К.** Некоторые вирусы и бактериальные токсины обладают свойством суперантигенов, вызывая неспецифическую активацию лимфоцитов, приводящую их к гибели. Объясните механизм их действия.

# Глава 11

# ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ ИММУННОГО РЕАГИРОВАНИЯ

Иммунная система осуществляет свою биологическую функцию с помощью сложного комплекса взаимосвязанных реакций. В них задействованы все ее структурные и функциональные элементы. Конкретные проявления иммунного реагирования можно подразделить на отдельные формы: антителообразование, иммунный фагоцитоз, клеточно-опосредованный киллинг, реакции гиперчувствительности, формирование иммунологической памяти или толерантности.

Все элементы иммунной системы имеют единый принцип управления и активируются практически одновременно, однако в зависимости от характера антигенного воздействия одна или несколько форм доминируют. Например, при токсинемической инфекции преимущественно активируется продукция антител, способных нейтрализовать молекулы токсина, при туберкулезной инфекции основную функциональную нагрузку выполняют факторы клеточного иммунитета.

## 11.1. Антитела и антителообразование

### 11.1.1. Природа антител

Одной из филогенетически наиболее древних форм иммунной защиты является биосинтез антител — белков, специфически реагирующих с антигенами. Антитела относятся преимущественно к γ-глобулиновой фракции белков плазмы крови, на долю которых приходится 15—25% ее белкового содержания, что составляет примерно 10—20 г/л. Поэтому антитела получили название *иммуноглобулинов*, и их обозначают символом Ig. Следовательно антитела — это γ-глобулины плазмы крови, способные специфически связываться с антигеном и участвовать во многих иммунных реакциях.

Антитела синтезируются В-лимфоцитами и их потомками — плазматическими клетками и в циркулирующей форме, и в виде рецепторных молекул на иммунокомпетентных клетках. Циркулирующие антитела подразделяются на сывороточные и секреторные. К антителам могут быть также отнесены *белки Бенс-Джонса*, которые являются фрагментами молекулы Ig (его легкая цепь) и *синтезируются в избытке при миеломной болезни*.

Строение и функцию антител изучали многие видные ученые: П. Эрлих (1885) предложил первую теорию гуморального иммунитета, Э. Беринг и С. Китазато (1887) получили первые антитоксические сыворотки к дифтерийному и столбнячному токсинам, А. Безредка (1923) разработал метод безопасного введения пациентам лечебных иммунных сывороток. Большая заслуга в расшифровке молекулярного строения Ig принадлежит Д. Эдельману и Р. Портеру (1959), а разгадка многообразия антител — Ф. Бернету (1953) и С. Тонегаве (1983).

### 11.1.2. Молекулярное строение антител

Иммуноглобулины — это белки сыворотки крови. Они секретируются *плазматическими клетками в ответ на антиген*. Молекулы Ig имеют универсальное строение (рис. 11.1). Они состоят из 2 пар полипептидных цепей: двух тяжелых (550–660 аминокислотных остатков, молекулярная масса — 50 кД) и двух легких (220 аминокислотных остатков, молекулярная масса — 20–25 кД). Обозначают их как Н- (от англ. *heavy* — тяжелый) и L- (от англ. *light* — легкий) цепи. Тяжелые и легкие цепи связаны между собой попарно дисульфидными связями (-S-S-). Между тяжелыми цепями также есть дисульфидная связь — это так называемый шарнирный участок. Такой тип межпептидного соединения позволяет молекуле Ig легко менять свою конформацию в зависимости от окружающих условий и состояния. Область шарнирного участка ответственна за взаимодействие с первым компонентом комплемента (C1) и его активацию по классическому пути.

Различают структурные варианты легких и тяжелых полипептидных цепей молекулы Ig. Легкие цепи бывают 2 типов: κ и λ (каппа и лямбда). Тяжелых цепей известно 5 типов: α, γ, μ, ε и δ (альфа, гамма, мю, эпсилон и дельта). Среди многообразия цепей α-типа выделяют $\alpha_1$- и $\alpha_2$-подтипы, μ-цепей — $\mu_1$ и $\mu_2$, γ-цепей — $\gamma_1$-, $\gamma_2$-, $\gamma_3$- и $\gamma_4$-подтипы.

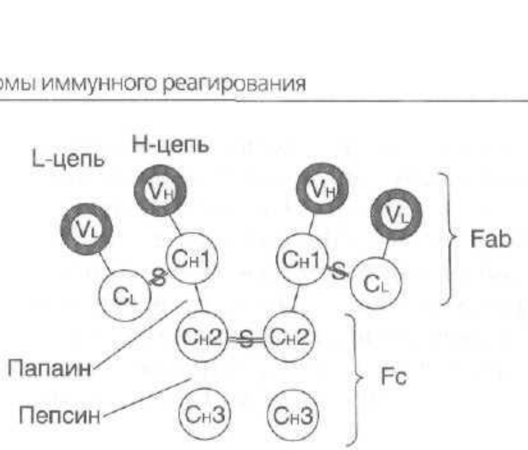



**Рис. 11.1.** Схема строения молекулы иммуноглобулина класса G: V — вариабельный домен; C — константный домен; S — дисульфидная связь шарнирного участка

Вторичная структура полипептидных цепей молекулы Ig имеет доменное строение — ее отдельные участки свернуты в глобулы (домены), стабилизированные внутренней дисульфидной связью. Таких доменов в составе тяжелой цепи Ig бывает 4–5, в легкой — 2. Каждый домен состоит примерно из 110 аминокислотных остатков.

Домены различаются по постоянству аминокислотного состава. Выделяют *С-домены* (от англ. *constant* — постоянный) с относительно постоянной структурой и *V-домены* (от англ. *variable* — изменчивый) с переменной структурой. В составе легкой цепи есть по одному V- и С-домену, а в тяжелой — один V- и 3–4 С-домена. Примечательно, что не весь вариабельный домен изменчив по своему аминокислотному составу, а лишь его незначительная часть — *гипервариабельная область*, на долю которой приходится около 25%.

Вариабельные домены легкой и тяжелой цепей совместно образуют участок, который специфически связывается с антигеном, — *антигенсвязывающий центр*, или *паратоп*. Гипервариабельные области тяжелой и легкой цепей определяют индивидуальные особенности строения антигенсвязывающего центра для каждого клона Ig и многообразие их специфичностей.

Обработка ферментами молекулы Ig приводит к ее гидролизу на определенные фрагменты. Так, папаин разрывает молекулу выше шарнирного участка и ведет к образованию трех фрагментов (см. рис. 11.1). Два из них способны специфически связываться с антигеном. Они состоят из цельной легкой цепи и участка тяжелой (V-

и С-домен), и в их структуру входят антигенсвязывающие участки. Эти фрагменты получили название *Fab* (от англ. — фрагмент, связывающийся с антигеном). Третий фрагмент, способный образовывать кристаллы, получил название *Fc* (от англ. — фрагмент кристаллизующийся). Он ответствен за связывание с рецепторами на мембране клеток макроорганизма (Fc-рецепторы) и некоторыми микробными суперантигенами (например, белком А стафилококка). Пепсин расщепляет молекулу Ig ниже шарнирного участка и ведет к образованию 2 фрагментов: Fc и двух сочлененных *Fab*, или $F(ab)_2$.

В структуре молекул Ig обнаруживают дополнительные полипептидные цепи. Так, полимерные молекулы IgM, IgA содержат *J-пептид* (от англ. *join* — соединяю), который объединяет отдельные мономеры в единое макромолекулярное образование (см. раздел 11.1.3). Молекулы секреторных Ig обладают *S-пептидом* (от англ. *secret* — секрет). Это так называемый *секреторный компонент*. Его молекулярная масса составляет 71 кД, он является β-глобулином и предохраняет молекулу Ig в секрете слизистых оболочек от ферментативного расщепления. Рецепторный Ig, локализующийся на цитоплазматической мембране антителопродуцирующих клеток, имеет дополнительный гидрофобный трансмембранный *М-пептид* (от англ. *membrane* — мембрана). Он прочно удерживает молекулу Ig в липидном бислое цитоплазматической мембраны и проводит рецепторный сигнал через цитоплазматическую мембрану внутрь клетки. J- и М-пептиды присоединяются к молекуле Ig в процессе ее биосинтеза. S-пептид является продуктом эпителиальной клетки — он присоединяется к J-пептиду полимерной молекулы Ig при ее транслокации через эпителиальную клетку.

### 11.1.3. Структурно-функциональные особенности иммуноглобулинов различных классов

В зависимости от особенностей молекулярного строения тяжелой цепи, а следовательно, наличия изотипических, или групповых, антигенных детерминант различают 5 классов или изотипов Ig (рис. 11.2). Молекулы, содержащие тяжелую цепь α-типа, относят к изотипу, или классу А (сокращенно IgA), δ-типа — IgD, ε-типа — IgE, γ-типа — IgG и μ-типа — IgM. Различают также подклассы Ig.

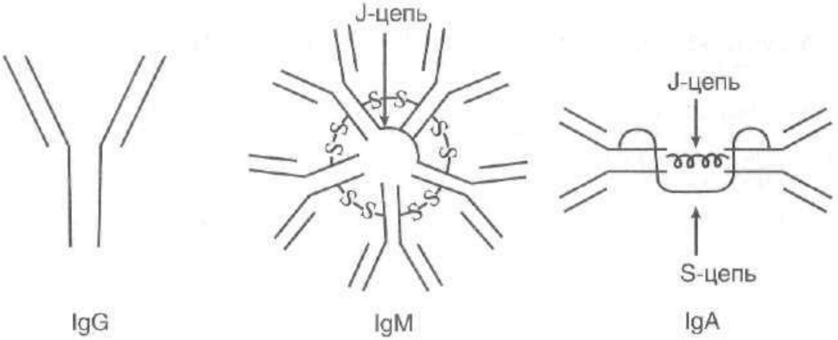



**Рис. 11.2.** Схема строения иммуноглобулинов различных классов (пояснение в тексте)

Для каждого изотипа Ig характерны свои особенности. В частности, Ig D, E и G имеют мономерное строение, IgM практически всегда является пентамером, а молекула IgA может быть моно-, ди- и тримером. Наиболее характерные черты различных изотипов Ig приведены в табл. 11.1.

**Таблица 11.1.** Основные характеристики иммуноглобулинов человека

| **Характеристика** | **IgM** | **IgG** | **IgA** | **IgD** | **IgE** |
|---|---|---|---|---|---|
| Молекулярная масса, кД | 900 | 150 | 160 | 185 | 190 |
| Количество мономеров | 5 | 1 | 1–3 | 1 | 1 |
| Валентность | 10 | 2 | 2–6 | 2 | 2 |
| Уровень в сыворотке крови, г/л | 0,5–1,9 | 8,0–17,0 | 1,4–3,2 | 0,03–0,2 | 0,002–0,004 |
| Период полураспада, сут | 5 | 25 | 6 | 3 | 2 |
| Связывание комплемента | +++ | ++ | — | — | — |
| Цитотоксическая активность | +++ | ++ | — | — | — |
| Опсонизация | +++ | + | + | — | — |
| Преципитация | + | ++ | + | — | + |
| Агглютинация | +++ | + | + | — | + |

*Окончание табл. 11.1*

| *Характеристика* | IgM | IgG | IgA | IgD | IgE |
|---|---|---|---|---|---|
| Участие в аллергических реакциях | + | + | + | — | +++ |
| Наличие рецепторов на лимфоцитах | + | + | + | + | + |
| Прохождение через плаценту | — | + | — | — | — |
| Наличие в секретах в секреторной форме | — | — | + | — | — |

**Иммуноглобулин класса G** составляет основную массу Ig сыворотки крови, на его долю приходится 70–80% всех циркулирующих Ig, при этом 50% содержится в тканевой жидкости. Среднее содержание IgG в сыворотке крови здорового взрослого человека — 12 г/л, что достигается к 7–10-летнему возрасту. Период полураспада IgG 21 день.

IgG — мономер, имеет 2 антигенсвязывающих центра, может связать 2 молекулы антигена подряд. Молекулярная масса около 160 кД, константа седиментации 7S. Синтезируется зрелыми В-лимфоцитами ($B_\gamma$) и плазматическими клетками. Хорошо определяется в сыворотке крови на пике первичного и при вторичном иммунном ответе. Обладает высокой *аффинностью* (см. раздел 11.1.5).

Различают подтипы G1–G4. IgG1 и G3 связывают комплемент, причем G3 активнее. IgG4 подобно IgE обладает цитофильностью (тропностью, или сродством, к тучным клеткам и базофилам) и участвует в развитии аллергической реакции I типа (см. раздел 11.4).

Легко проходит через плацентарный барьер и обеспечивает гуморальный иммунитет новорожденного в первые 3–4 мес после рождения, в том числе обнаруживается в молоке. IgG обеспечивает нейтрализацию и маркирование антигена, осуществляет запуск комплементопосредованного цитолиза и АЗКЦТ.

**Иммуноглобулин класса М** — наиболее крупная молекула из всех Ig. Это пентамер, который имеет 10 антигенсвязывающих центров. Его молекулярная масса около 900 кД, константа седи-

ментации 19S. Различают подтипы M1 и M2. Тяжелые цепи молекулы IgM, в отличие от других изотипов, построены из 5 доменов. Являясь полимерной молекулой, содержит J-цепь. Период полураспада 5 дней.

На его долю приходится 5—10% всех циркулирующих Ig. Среднее содержание IgM в сыворотке крови здорового взрослого человека около 1 г/л. Этого уровня человек достигает уже к 2–4-летнему возрасту. IgM филогенетически наиболее древний иммуноглобулин. Образуется в начале первичного иммунного ответа.

Обладает высокой авидностью, наиболее эффективный активатор комплемента по классическому пути. Большая часть нормальных антител и изоагглютининов относится к IgM. Не проходит через плаценту. Обнаружение высоких титров специфических антител изотипа M в сыворотке крови новорожденного указывает на бывшую внутриутробную инфекцию или дефект плаценты. IgM обеспечивает нейтрализацию и маркирование антигена, осуществляет запуск комплементопосредованного цитолиза и АЗКЦТ. Является маркером острого инфекционного процесса.

**Иммуноглобулин класса А** существует в сывороточной и секреторной формах. Около 60% всех IgA содержится в секретах слизистых оболочек.

*Сывороточный* IgA. На его долю приходится около 10—15% всех циркулирующих Ig. В сыворотке крови здорового взрослого человека содержится около 2,5 г/л IgA, максимум достигается к 10-летнему возрасту. Период полураспада 6 дней.

IgA — мономер, имеет 2 антигенсвязывающих центра, молекулярную массу около 170 кД и константу седиментации 7S. Различают подтипы A1 и A2. Синтезируется зрелыми иммунными В-лимфоцитами ($B_\alpha$) и плазматическими клетками. Хорошо определяется в сыворотке крови на пике первичного и при вторичном иммунном ответе. Обладает высокой аффинностью. Не связывает комплемент. Не проходит через плацентарный барьер. IgA обеспечивает нейтрализацию и маркирование антигена, осуществляет запуск АЗКЦТ.

*Секреторный* IgA (*s*IgA) существует в полимерной форме в виде ди- или тримера (4- или 6-валентный), несет 4 или 6 паратопов и содержит J- и S-пептиды. Молекулярная масса 350 кД и выше, константа седиментации 13S и выше.

Синтезируется $B_\alpha$-лимфоцитами, плазматическими клетками и, возможно, B1-лимфоцитами в пределах слизистых оболочек и вы-

деляется в их секреты. Объем продукции может достигать 5 г в сутки. Пул sIgA считается самым многочисленным в организме — его количество превышает суммарное содержание IgM и IgG. В сыворотке крови sIgA не обнаруживается.

Формирование четвертичной структуры молекулы sIgA происходит при ее транслокации через эпителиальную клетку. На базальной и латеральной поверхности эпителиальная клетка несет рецептор к J-цепи полимерной молекулы Ig (JR). Присоединяясь к рецептору, IgA эндоцитируется клеткой в виде везикулы и переносится к апикальной поверхности эпителиоцита, где JR подвергается ферментативному расщеплению. В результате IgA высвобождается в слизистый секрет просвета органа уже в секреторной форме, так как оставшийся прикрепленным к молекуле Ig фрагмент JR становится S-цепью.

Секреторная форма IgA — основной фактор специфического гуморального местного иммунитета слизистых оболочек желудочно-кишечного и респираторного тракта, мочеполовой системы. Благодаря S-цепи он устойчив к действию протеаз. sIgA не активирует комплемент, но эффективно связывается с антигенами, нейтрализует их и препятствует адгезии микробов на эпителиальных клетках.

**Иммуноглобулин класса E** называют также *реагином*. Содержание в сыворотке крови крайне невысоко — примерно 0,00025 г/л. Молекулярная масса около 190 кД, константа седиментации примерно 8S, мономер. На его долю приходится около 0,002% всех циркулирующих Ig. Этот уровень достигается к 10—15 годам жизни.

Синтезируется зрелыми B-лимфоцитами ($B_\varepsilon$) и плазматическими клетками преимущественно в лимфоидной ткани бронхолегочного дерева и желудочно-кишечного тракта. Не связывает комплемент. Не проходит через плацентарный барьер. Обладает выраженной цитофильностью — тропностью к тучным клеткам и базофилам. Участвует в развитии гиперчувствительности немедленного типа — реакция I типа (см. раздел 11.4).

**Иммуноглобулин класса D** практически полностью содержится в сыворотке крови в концентрации около 0,03 г/л (около 0,2% общего количества циркулирующих Ig). IgD имеет молекулярную массу 160 кД и константу седиментации 7S, мономер. Не связывает комплемент. Не проходит через плацентарный барьер. Экспрессируется на предшественниках B-лимфоцитов.

**Рецепторные иммуноглобулины**, или мембранные, локализуются на цитоплазматической мембране B-лимфоцитов и выполняют

функции их антигенспецифических рецепторов. Имеют те же изотип и специфичность, что и синтезируемые в межклеточную среду антитела. Содержат особый дополнительный М-пептид, благодаря которому молекула рецепторного Ig фиксируется в цитоплазматической мембране иммунокомпетентной клетки.

**Нормальные антитела**, или естественные, — совокупность Ig сыворотки крови человека различной специфичности, формирующих их базальный уровень. К ним относят изогемагглютинины — антитела к эритроцитарным антигенам групп крови (например, система АВ0), антигенам бактерий кишечной группы, кокков и некоторых вирусов. Эти антитела постоянно образуются в организме без видимой антигенной стимуляции. Отражают готовность макроорганизма к иммунному реагированию, а также свидетельствуют об отдаленном контакте с антигеном.

**Моноклональные антитела**. Каждый В-лимфоцит и его потомки, образовавшиеся в результате клеточного деления (т.е. клон), способны синтезировать антитела с паратопом строго определенной специфичности. Такие антитела получили название *моноклональных*. В естественных условиях макроорганизма получить моноклональные антитела практически невозможно, так как на одну и ту же антигенную детерминанту одновременно реагируют до 100 различных клонов В-лимфоцитов, незначительно различающихся антигенной специфичностью. Поэтому в результате иммунизации даже монодетерминантным антигеном мы всегда получаем *поликлональные* антитела.

Принципиально получение моноклональных антител выполнимо, если провести предварительную селекцию антителопродуцирующих клеток и их клонирование, т.е. получение необходимых клонов. Однако задача осложняется тем, что число генераций В-лимфоцитов, как и других эукариотических клеток, ограничено. Тем не менее проблема была успешно решена Д. Келлером и Ц. Мильштайном (1975). Исследователи получили гибриды иммунных В-лимфоцитов и миеломных (опухолевых) клеток, которые обладали свойствами антителопродуцента и «бессмертием» раково-трансформированной клетки. Такой вид клеток получил название *гибридом*. В ходе дальнейшей селекции были отобраны клоны с наивысшей продуктивностью и аффинностью специфических антител. Гибридомные моноклональные антитела нашли широкое применение при создании диагностических и лечебных иммунобиологических препаратов.

**Полные и неполные антитела**. Такое подразделение основано на способности образовывать в реакции агглютинации или преципитации (*in vitro*) хорошо различимый глазом результат. Таким свойством обладают *полные антитела*. К ним относятся IgM, а также некоторые IgA и G.

*Неполные антитела* лишены такой способности, несмотря на то, что они специфически связываются с антигеном — их еще называют неагглютинирующими, непреципитирующими или блокирующими антителами (см. главу 13).

### 11.1.4. Антигенность антител

Иммуноглобулин, как и всякий белок, обладает антигенностью и выраженной иммуногенностью. В молекуле Ig различают 4 типа атигенных детерминант: видовые, изотипические, аллотипические и идиотипические. *Видовые* антигенные детерминанты характерны для Ig всех особей данного вида (например, кролика, собаки, человека). Они определяются строением легкой и тяжелой цепей. По этим детерминантам можно идентифицировать видовую принадлежность антител.

*Изотипические* антигенные детерминанты являются групповыми. Они локализуются в тяжелой цепи и служат для дифференцировки Ig на 5 изотипов (классов) и множество подклассов (см. раздел 11.1.3).

*Аллотипические* антигенные детерминанты являются индивидуальными, т.е. присущими конкретному организму. Они располагаются в легкой и тяжелой полипептидных цепях. На основании строения аллотипических детерминант можно различать особи внутри одного вида.

*Идиотипические* антигенные детерминанты отражают особенности строения антигенсвязывающего центра самой молекулы Ig. Они образованы V-доменами легкой и тяжелой цепей молекулы Ig. Обнаружение идиотипических антигенных детерминант послужило основанием для создания теории идиотип-антиидиотипической регуляции биосинтеза антител.

### 11.1.5. Механизм взаимодействия антитела с антигеном

В процессе взаимодействия с антигеном принимает участие *антигенсвязывающий центр* молекулы Ig, или *паратоп*, который способен связываться со строго определенной антигенной детерми-

нантой. Эта связь осуществляется за счет слабых взаимодействий (ван-дер-ваальсовы силы, водородные связи, электростатические взаимодействия) и отличается неустойчивостью — образовавшийся иммунный комплекс (ИК) может легко диссоциировать: АГ + АТ $\leftrightarrow$ ИК.

Продолжительность существования иммунного комплекса определяется целым рядом факторов. При этом важное значение имеют особенности антитела, антигена и условия, в которых происходит их взаимодействие. К особенностям антитела следует отнести его аффинность и авидность.

*Аффинность* — сила специфического взаимодействия антитела с антигеном (или энергия их связи). Аффинность определяется степенью стерического (пространственного) соответствия эпитопа и паратопа. Чем больше образуется связей между эпитопом и паратопом, тем выше будут устойчивость и продолжительность жизни образовавшегося иммунного комплекса. Иммунный комплекс, образованный низкоаффинными антителами, чрезвычайно неустойчив и имеет малую продолжительность существования.

Установлено, что в условиях макроорганизма с одной и той же антигенной детерминантой способны одновременно прореагировать и образовать иммунный комплекс около 100 различных клонов антител. Все они будут отличаться структурой антигенсвязывающего центра, специфичностью и аффинностью. Аффинность антител существенно меняется в процессе иммунного ответа в связи с селекцией наиболее специфичных клонов В-лимфоцитов. Наименее аффинными считаются нормальные антитела. По расчетам общее количество различных антигенспецифических клонов В-лимфоцитов достигает $10^6$—$10^7$.

Другой характеристикой Ig является *авидность*. Под этим термином понимают прочность связывания антитела и антигена. Эта характеристика определяется аффинностью Ig и числом антигенсвязывающих центров. Наибольшей авидностью обладают антитела класса М, так как они имеют 10 антигенсвязывающих центров.

*Эффективность взаимодействия антитела с антигеном* существенно зависит от условий, в которых происходит реакция, прежде всего от pH среды, осмотической плотности, солевого состава и температура среды. Оптимальными для реакции антиген—антитело являются физиологические условия внутренней среды макроорганизма: близкая к нейтральной реакция среды, присутствие фос-

фат-, карбонат-, хлорид- и ацетат-ионов, осмолярность физиологического раствора (концентрация раствора 0,15 М), а также температура 36–37 °С.

### 11.1.6. Свойства антител

Благодаря уникальной способности специфически связываться с антигенными детерминантами антитела выполняют в организме ряд важнейших функций.

К *прямым эффектам антител относится нейтрализация* — связывание и блокирование паратопом иммуноглобулина активного центра биологически активной молекулы, например токсина, рецептора, лекарственного препарата и пр. Эффект имеет обратимый характер в случае распада иммунного комплекса. На этом принципе основан механизм действия антитоксических, противовирусных и многих других лечебных иммунных сывороток.

Другим прямым эффектом является энзиматическое действие антител. Благодаря реликтовой протеазной или нуклеазной активности (см. раздел 11.1.3) иммуноглобулины способны вызывать деструкцию молекулы антигена (например, расщепление отдельных пептидов или ДНК). Запуск системы комплемента по классическому пути также представляет собой результат ферментолиза.

В большинстве случаев взаимодействие антител с антигеном в организме не влечет за собой его структурную или функциональную модификацию. Прочно связываясь с эпитопом, антитела маркируют молекулу антигена — обозначают его как мишень для других факторов иммунитета (фагоцитоз, лизис).

К непрямым эффектам относятся:

- индукция комплементопосредованного лизиса чужеродных клеток (см. раздел 9.2.3.3), наилучшими свойствами обладает IgM (IgM > IgG3 > IgG1);
- запуск антителозависимой клеточно-опосредованной цитотоксичности АЗКЦТ (см. раздел 11.3.);
- индукция гиперчувствительности немедленного, или I, типа (см. раздел 11.4);
- опосредование иммунного фагоцитоза (см. раздел 11.2).

Клеточно-опосредованные эффекты иммуноглобулинов реализуются благодаря экспрессии на мембране иммунокомпетентных клеток рецепторов к Fc-фрагменту молекулы иммуноглобулина (*FcR*). Эти рецепторы являются трансмембранными белковыми

молекулами и различаются по специфичности к определенному изотипу тяжелой цепи молекулы Ig. Различают также высокоаффинные и низкоаффинные *FcR*. Первые могут взаимодействовать с интактной молекулой иммуноглобулина. В некоторых случаях она используется как ко-рецепторный фактор (базофилы, тучные клетки). Низкоаффинные *FcR* связываются уже с иммунным комплексом, их называют непрямыми иммунорецепторами.

*Помимо эффекторных свойств, антитела являются активными* регуляторами иммунореактивности. Так, Ig являются антигенспецифическими рецепторами В-лимфоцитов.

Специфическое связывание эпитопов специфическими антителами может блокировать развитие как гуморального, так и клеточного иммунного ответа. Этот эффект используется в клинической практике, например, для профилактики гемолитической болезни новорожденных в результате резус-конфликта. Антитела, специфичные к идиотипическим антигенным детерминантам Ig, могут управлять силой антительного иммунного реагирования.

### 11.1.7. Генетика иммуноглобулинов

Для структуры молекул Ig характерно уникальное генетическое кодирование. Методами молекулярной генетики было доказано, что структура молекулы Ig контролируется большим числом генов, которые имеют фрагментарную организацию, образуют три группы, располагаются в трех различных хромосомах и наследуются независимо.

Первая группа генов кодирует первичную структуру легкой цепи λ-типа, вторая — легкой цепи κ-типа, а третья — всех типов тяжелых цепей (α, δ, ε, γ и μ). Гены, относящиеся к каждой группе, находятся на соответствующей хромосоме в непосредственной близости друг от друга, располагаются последовательно (рис. 11.3) и разделены *интронами*.

Участок ДНК, кодирующий строение легкой цепи λ-типа, содержит 2 *V-сегмента* (контролируют структуру V-доменов) и 4 *С-сегмента* (контролируют структуру С-доменов). Между С- и V-сегментами располагается *J-сегмент* (от англ. *join* — соединяющий). Легкая цепь κ-типа кодируется несколькими сотнями V-сегментов ДНК, 4 J-сегментами и одним С-сегментом. Группа генов, контролирующая структуру тяжелых цепей, имеет еще более сложное строение. Наряду с V-, С- и J- сегментами ДНК

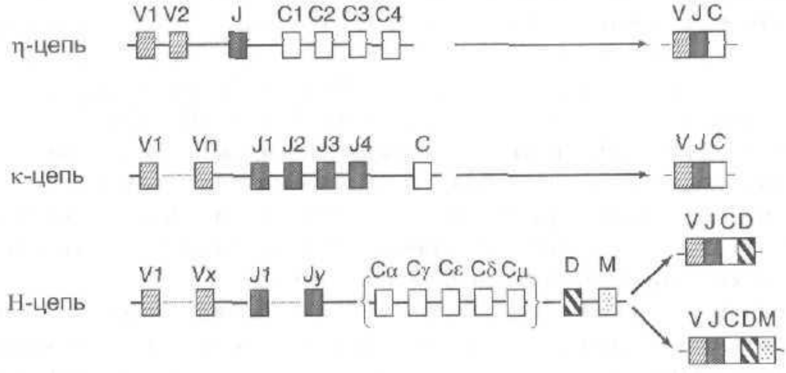



**Рис. 11.3.** Схема строения генов иммуноглобулинов (пояснение в тексте)

в их состав входят 20 *D-сегментов* (от англ. *divercity* — разнообразие). Кроме того, имеется *М-сегмент*, который кодирует биосинтез мембраноассоциированного участка молекулы рецепторного Ig.

Созревание пре-В-лимфоцитов сопровождается перестройками в их генетическом аппарате. Происходят произвольное сближение отдельных фрагментов ДНК и сборка в пределах соответствующих хромосом единых функциональных генов. Этот процесс называется *сплайсинг* (от англ. *splicing* — сращивание, состыковывание). Пропущенные участки ДНК исключаются из дальнейшего считывания. С функциональных генов в дальнейшем транскрибируется про-мРНК, а затем окончательная мРНК, кодирующая первичную аминокислотную последовательность L- и Н-цепей молекулы Ig. Параллельно со сплайсингом в отдельных участках V-сегментов генов иммуноглобулинов могут происходить точечные мутации и нематричная достройка олигонуклеотидов. Эти участки ДНК получили название *гипермутабельных областей.*

Сплайсинг и мутационный процесс в генах Ig носят случайный характер. Они происходят в каждом лимфоците независимо друг от друга и уникальны, что в бесконечное количество раз повышает разнообразие V-доменов и в конечном счете структуры паратопов и идиотипических антигенных детерминант молекулы Ig. Поэтому в организме всегда существуют или в любой момент могут появиться В-лимфоциты, специфичные практически к любому антигену. Этот тезис составляет основу молекулярно-генетической теории

происхождения многообразия специфичностей антител, разработанной С. Тонегавой (1983).

В процессе первичного иммунного ответа размножение В-лимфоцитов также сопровождается рекомбинационными перестройками в пределах иммуноглобулиновых генов, но уже в пределах С-сегментов. Это проявляется последовательной сменой класса Ig: на ранних этапах дифференцировки В-лимфоциты синтезируют Ig классов М и D, на более поздних — классов G, А или Е (редко).

### 11.1.8. Динамика антителопродукции

Иммунная система реагирует на появление во внутренней среде макроорганизма антигена усилением биосинтеза специфических антител. Это достигается размножением клонов антигенспецифических клеток-антителопродуцентов. При этом антиген выступает в роли как пускового, так и селектирующего фактора: преимущественно активируются клоны с наивысшей специфичностью, т.е. наибольшей аффинностью рецепторных молекул Ig. Параллельно с размножением идет процесс дифференцировки В-лимфоцитов. Наблюдаются перестройка в геноме клеток и переключение их биосинтеза с крупной высокоавидной молекулы IgM на более легкие и экономичные высокоаффинные IgG или IgA.

Антителопродукция в ответ на антигенный стимул имеет характерную динамику. Ее можно проследить на примере сывороточных Ig (рис. 11.4). Выделяют латентную (индуктивную), логарифмическую, стационарную фазы и фазу снижения. В *латентную фазу* антителопродукция практически не изменяется и остается на базальном уровне. В этот период происходят переработка и представление антигена иммунокомпетентным клеткам и запуск пролиферации антигенспецифических клонов клеток-антителопродуцентов. Ввиду того что клетки делятся дихотомически (т.е. надвое), прирост их количества происходит в логарифмической зависимости и поэтому после первых циклов деления оно изменяется незначительно. Параллельно происходят дифференцировка пре-В-лимфоцитов в зрелые формы и плазматические клетки и переключение синтезируемых изотипов Ig. Во время *логарифмической фазы* наблюдается интенсивный прирост количества

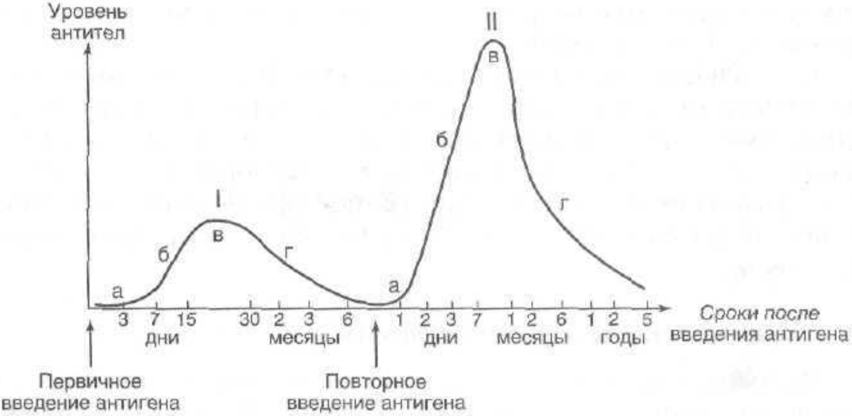



**Рис. 11.4.** Динамика антителообразования при первичном (I) и вторичном (II) иммунном ответах. Фазы антителообразования: а — латентная; б — логарифмического роста; в — стационарная; г — снижения

антигенспецифических В-лимфоцитов, что находит отражение в существенном нарастании титров специфических антител. В *стационарной фазе* количество специфических антител и синтезирующих их клеток достигает максимума и стабилизируется. Освобождение макроорганизма от антигена устраняет антигенный стимул, поэтому в *фазе снижения* наблюдается постепенное уменьшение количества клонов специфических антителопродуцентов и титров соответствующих антител.

Динамика антителообразования существенно зависит от первичности или вторичности контакта с антигеном. При первичном контакте с антигеном развивается *первичный иммунный ответ*. Для него характерны длительные латентная и логарифмическая (7–15 сут) фазы. Первые диагностически значимые титры специфических антител регистрируются на 10–14-е сутки от момента иммунизации. Стационарная фаза продолжается 15–30 сут, а фаза снижения — 1–6 мес.

В течение первичного иммунного ответа происходят созревание, размножение клонов и дифференцировка антигенспецифических В-лимфоцитов, а также переключение биосинтеза Ig с изотипа М на изотопы G, A или E. В итоге первичного иммунного реагирования формируются многочисленные клоны антигенспецифических антителопродуцирующих клеток и клеток иммуноло-

гической памяти, а во внутренней среде макроорганизма в высоком титре накапливаются специфические IgG и/или IgA. Таким образом обеспечиваются активное противодействие иммунной системы внедрению в макроорганизм антигена и высокая готовность к повторной с ним встрече.

Со временем антительный ответ угасает. Элиминация антигена исключает новое стимулирование к клонообразованию, а появившиеся ранее плазматические клетки имеют короткую продолжительность жизни. Вместе с тем В-лимфоциты иммунологической памяти надолго остаются циркулировать в организме.

Повторный контакт иммунной системы с тем же антигеном ведет к формированию *вторичного иммунного ответа* (см. рис. 11.4). Его латентная фаза значительно укорочена, а логарифмическая фаза отличается более интенсивной динамикой прироста и более высокими титрами специфических антител. Для стационарной фазы и фазы снижения свойственна затяжная динамика (несколько месяцев или даже лет). При вторичном иммунном ответе организм сразу же в подавляющем большинстве синтезирует IgG. Это обусловлено подготовленностью иммунной системы к повторной встрече с антигеном за счет формирования иммунологической памяти (см. раздел 11.5): многочисленные клоны антигенспецифических В-лимфоцитов, оставшиеся после первичного иммунного реагирования, быстро размножаются и интенсивно включаются в процесс антителогенеза.

Для развития гуморального иммунитета слизистых оболочек характерны те же процессы и динамика антителообразования. Однако в данном случае в слизистых оболочках в подавляющем большинстве созревают и размножаются В-лимфоциты, продуцирующие полимерные молекулы IgA.

Явление интенсивного антителообразования при повторном контакте с антигеном широко используется в практических целях, например *вакцинопрофилактике*. Для создания и поддержания иммунитета на высоком защитном уровне схемы вакцинации предусматривают многократное введение антигена для формирования и поддержания иммунологической памяти (см. главу 14).

Этот же феномен используют при получении высокоактивных лечебных и диагностических иммунных сывороток (*гипериммунных*). Для этого животным или донорам производят многократные введения препаратов антигена по специальной схеме.

Динамика и интенсивность антителообразования в значительной степени зависят от иммуногенности антигена: дозы, способа и кратности его введения, а также от состояния макроорганизма. Попытка повторного введения антигена в латентной фазе может привести к иммунологическому параличу — иммунологической неотвечаемости на антиген в течение определенного периода времени.

### 11.1.9. Теории разнообразия антител

Для объяснения механизмов антителопродукции и разнообразия специфичности антител было предложено множество гипотез и теорий. Только немногие из них получили практическое подтверждение, большинство представляет исторический интерес.

Первую принципиально важную концепцию *боковых цепей* выдвинул П. Эрлих (1898). Согласно этой концепции, клетки органов и тканей имеют на своей поверхности рецепторы, способные в силу химического сродства связывать антиген и инактивировать его. Затем они отделяются с поверхности клетки и замещаются вновь синтезированными. Эта теория заложила основные представления о гуморальном иммунитете и рецепторах иммунокомпетентных клеток.

Заслуживают внимания *инструктивные* или *матричные* теории. Согласно концепциям, предложенным Ф. Брейнлем и Ф. Гауровитцем (1930), Л. Полингом (1940), антиген является матрицей, с которой штампуется молекула антител. Эти теории оказались тупиковыми в связи с открытием Д. Уотсоном и Ф. Криком (1953) механизма кодирования в ДНК генетической информации.

Ряд теорий исходил из предположения о предсуществовании в организме антител практически ко всем возможным антигенам (Ерне Н., 1955; Бернет Ф., 1959). В настоящее время наиболее обоснованной считается теория Ф. Бернета, которая получила название *клонально-селекционной*. Согласно данной теории, лимфоидная ткань состоит из огромного числа клонов антигенореактивных лимфоцитов, которые специализируются на выработке антител к определенным антигенам. Клоны уже предсуществуют в новорожденном организме. Попавший в организм антиген селективно (избирательно) активирует специфичный к нему клон лимфоцитов, который размножается и начинает вырабатывать специфичные к данному антигену антитела. Если доза антигена слишком велика,

то клон реагирующих на него лимфоцитов устраняется (элиминируется) из организма — так в эмбриональном периоде формируется иммунологическая толерантность (нечувствительность) к собственным антигенам.

Теория Бернета объясняет многие иммунологические реакции (антителообразование, гетерогенность антител, иммунологическую память, толерантность), однако она не способна объяснить происхождение всего многообразия специфичности антител. Бернет предположил, что в организме существует около 10 тыс. клонов специфических антителопродуцирующих клеток. Однако мир антигенов оказался на 2—3 порядка обширнее, и организм отвечает на практически любой из них, в том числе и на искусственно полученный, несуществующий в природе.

Значительную ясность в представление о разнообразии специфичности антител внес С. Тонегава (1983), который дал этому явлению генетическое обоснование. Молекулярно-генетическая теория С. Тонегавы исходит из того, что в генах иммуноглобулинов постоянно происходят мощные рекомбинационные и мутационные процессы. В результате возникает огромное количество вариантов и комбинаций генов, которые кодируют разнообразные специфичности иммуноглобулинов. Каждый клон антителопродуцирующих лимфоцитов обладает своим уникальным вариантом гена иммуноглобулина (см. раздел 11.1.7).

Следует также упомянуть теорию сетевой регуляции иммунной системы. Ее основой является выдвинутая Н. Ерне (1974) идея идиотип-антиидиотипического взаимодействия. Согласно этой теории, иммунная система представляет собой бесконечную цепь взаимодействующих антигенных идиотипов иммуноглобулинов и направленных к ним антиидиотипических антител. Введение антигена вызывает каскадную реакцию образования антител 1-го порядка. Это антитело, действуя как антиген, вызывает образование к своему идиотипу антител 2-го порядка. К идиотипу антител 2-го порядка синтезируются антитела 3-го порядка и т.д. При этом антитело каждого порядка как бы несет внутренний образ антигена, который передается эстафетно в цепи образования антиидиотипических антител. Доказательством этой теории являются обнаружение антиидиотипических антител, способных вызвать в организме иммунитет к соответствующему антигену, а также существование лимфоцитов, сенсибилизированных к антиидиотипическим анти-

телам. С помощью теории Ерне можно понять формирование иммунологичской памяти и возникновение аутоиммунных реакций. Однако она не способна объяснить много других явлений иммунитета: механизм иммунологического распознавания «свой—чужой», управления каскадом идиотип-антиидиотипических реакций и т.д. Данная теория не получила дальнейшего развития.

Выдающийся отечественный иммунолог П.Ф. Здродовский в 60-е годы XX столетия сформулировал физиологическую концепцию иммуногенеза — гипоталамо-адреналовую теорию регуляции иммунитета. Основная идея его теории сводилась к тому, что продукция антител подчиняется общим физиологическим законам. Ведущая роль в этом процессе принадлежит гормонам и нервной системе.

## 11.2. Иммунный фагоцитоз

Феномен *иммунного фагоцитоза* основан на поглощении фагоцитами (см. раздел 9.2.2) антигенов, входящих в состав иммунных комплексов. При этом антигенами могут быть как отдельные молекулы или их агрегаты, так и цельные клетки или их обломки. Для осуществления иммунного фагоцитоза необходимо участие молекул иммуноглобулинов и/или комплемента, а также рецепторов к Fc-участку молекулы иммуноглобулина и компонентам комплемента на клеточной мембране фагоцитирующей клетки. Рецепторы обеспечивают узнавание и захват фагоцитом иммунных комплексов или опсонизированных антигенов, которые потом эндоцитируются. Таким образом фагоциты участвуют в элиминации (удалении) антигенов из организма и восстановлении его гомеостаза.

## 11.3. Опосредованный клетками киллинг

Иммунная система располагает независимым от системы комплемента способом уничтожения чужеродных клеток. Эта форма иммунного реагирования осуществляется непосредственно клетками-киллерами и получила название *«опосредованный клетками киллинг»*. Киллинг способны осуществлять активированные фагоциты, Т-киллеры, естественные киллеры и некоторые другие клетки. Клетки-киллеры осуществляют санацию организма от чужеродных, трансформированных или инфицированных клеток.

Механизм клеточно-опосредованного киллинга достаточно универсален. Киллеры вырабатывают ряд веществ, которые вызывают нарушение целостности клеточной мембраны (или стенки) или индуцируют апоптоз. Они осуществляют свою функцию дистантно (на расстоянии) или при непосредственном контакте. Мишенью для них являются раково-трансформированные, мутантные или зараженные вирусами клетки, грибы, простейшие, гельминты, некоторые бактерии и другие чужеродные клетки.

Способ распознавания киллерами генетической чужеродности клеток-мишеней определяется типом его антигенсвязывающего рецептора. Различают антителозависимую и антителонезависимую *клеточно-опосредованную цитотоксичность.*

### 11.3.1. Антителозависимая клеточно-опосредованная цитотоксичность

АЗКЦТ реализуется благодаря экспрессии на мембране иммунокомпетентных клеток рецепторов к Fc-фрагменту молекулы иммуноглобулина (*FcR*). Эти рецепторы являются трансмембранными белковыми молекулами и специфичны к определенному изотипу тяжелой цепи молекулы Ig, связанной в иммунный комплекс. Поэтому распознавание чужеродных клеток происходит при помощи *FcR* по антителам, которые предварительно связались с поверхностными антигенами клеток-мишеней. АЗКЦТ могут осуществлять активированные макрофаги, естественные киллеры *и эозинофилы.*

*Активированные макрофаги* (см. раздел 9.2.2) продуцируют перекисные и $NO^{\cdot}$ ион-радикалы и ферменты, которые могут поражать мембрану (или стенку) клетки после ее фагоцитирования.

В АЗКЦТ принимают участие *естественные килеры* с фенотипом $CD16^{+}CD56^{мало}$. Этот фенотип естественных киллеров (кровяные ЕК) постоянно циркулирует в кровотоке и других биологических жидкостях в поиске клеток, инфицированных различными паразитами (вирусами, бактериями, простейшими) и помеченных Ig. При контакте с зараженной клеткой естественный киллер индуцирует разрушение клеток-мишеней осмотическим лизисом (перфорин) или индукцией в них апоптоза (гранзимы, гранулизин).

АЗКЦТ *эозинофилов* имеет узкую антигельминтную специфичность. При распознавании паразитов, уже помеченных IgA или IgE, эозинофилы выделяют путем дегрануляции антигельминтные

токсичные факторы (ферменты и белковые токсины) и синтезируют цитокины, стимулирующие клеточное звено иммунитета, и липидные медиаторы воспаления.

### 11.3.2. Антителонезависимая клеточно-опосредованная цитотоксичность

АНКЦТ осуществляется без участия молекулы Ig клетками лимфоидного ряда, несущими иммунорецепторы прямого распознавания. К этой группе клеток относятся Т-киллеры, естественные киллеры с фенотипом $CD16^{-}CD56^{много}$ и Т-хелперы.

Основной клеткой, использующей этот тип механизма, является *Т-киллер* (αβ-тип), который при помощи *TCR* анализирует структуру МНС I класса на мембране клеток собственного организма и определяет его аллогенность. Контакт зрелого активированного Т-киллера с чужеродной клеткой-мишенью запускает их цитотоксические механизмы: осмотический лизис (перфорин) и индукцию апоптоза (гранзимы).

*Киллинг клетки-мишени осуществляется в несколько этапов.*

- *Установление плотного контакта.* Т-киллер прикрепляется к поверхности клетки-мишени, между клетками образуется тесный контакт, или *интерфейс*, с узким синаптическим пространством.
- *Активация Т-киллера. TCR* эффектора анализирует комплекс МНС I класса. В случае установления его чужеродности Т-киллер активируется и начинает синтезировать токсичные субстанции, которые накапливаются в гранулах. Для обеспечения строго направленного действия происходит полярное перераспределение внутриклеточных органелл киллера: гранулы, содержащие токсичные субстанции, и аппарат Гольджи перемещаются в сторону контакта.
- *Экзоцитоз токсических субстанций.* Содержимое гранул выделяется в узкое синаптическое пространство между клетками путем экзоцитоза.
- *Токсическое воздействие.* В результате воздействия перфорина в мембране клетки-мишени образуются поры, способные вызвать осмотический лизис. Через поры внутрь клетки проникают гранзимы и гранулизин, которые запускают апоптоз.

Точный механизм специфического распознавания Т-киллером мембранных антигенов клетки-мишени и направленный токси-

ческий удар предотвращают ошибочный лизис собственных нормальных клеток.

*Естественные киллеры*, имеющие фенотип $CD16^{-}CD56^{много}$, получили название тканевых, так как они не циркулируют в организме, а накапливаются в определенных зонах: портальных воротах печени, децидуальной оболочке беременной матки и других органах, содержащих забарьерные антигены. Мишенью для этих киллеров являются активированные лимфоциты, для которых характерен синтез в большом количестве *Fas*-рецептора. Экспрессируемый на клеточной мембране тканевых естественных киллеров *Fas*-лиганд связывается с *Fas*-рецептором и индуцирует в активированном лимфоците апоптоз. Описанный механизм цитотоксичности позволяет элиминировать из организма лимфоциты, позитивно прореагировавшие на пищевые, эмбриональные и забарьерные аллоантигены. Это позволяет избежать развития пищевой аллергии, невынашивания беременности или аутоиммунного поражения тканей.

Подобный эффект также свойствен Т-киллерам и $T_1$-хелперам. Элиминация активированных лимфоцитов путем индукции в них апоптоза — один из эффективных путей иммунорегуляции в периферических тканях.

## 11.4. Реакции гиперчувствительности

В ряде случаев введение антигена в организм может индуцировать аномальную реакцию, которая имеет черты патологического процесса. Эта форма реагирования, основу которой составляют естественные физиологические механизмы, получила название *аллергии* (от греч. *allos* — иной и *ergon* — действие). Антигены, вызывающие аллергические реакции, получили название *аллергенов*, а наука, которая изучает аллергию, называется *аллергологией*.

Понятие «аллергия» было предложено французским ученым К. Пирке (1906). Он понимал аллергию как измененную реакцию макроорганизма на повторное введение антигена и относил к ней как гипер-, так и гипореактивность. По современному определению, аллергия — это повышенная извращенная специфическая реакция макроорганизма на повторный контакт организма с аллергеном.

Для формировании аллергии необходима предварительная сенсибилизация макроорганизма к аллергену, или аллергизация. Ее можно вызвать очень малыми, субиммунизирующими дозами ан-

тигена (например, введением морской свинке 0,000001 мл лошадиной сыворотки), которые получили название *сенсибилизирующих*. Повторное введение того же антигена через определенный промежуток времени вызывает аллергическую реакцию. Дозу антигена, вызывающую собственно аллергическую реакцию, называют *разрешающей*.

В развитии аллергической реакции выделяют три стадии: иммунологическую, патохимическую и патофизиологическую. В течение *иммунологической стадии* в ответ на аллерген образуются антигенчувствительные клетки, специфические антитела и иммунные комплексы. *Патохимическая стадия* характеризуется образованием медиаторов воспаления и биологически активных аминов, которые играют основную роль в механизме аллергических реакций. В течение *патофизиологической стадии* проявляется клиническая картина аллергической реакции. Как правило, клинические проявления аллергии полиморфны.

Первая классификация аллергий была предложена Р. Куком в 1947 г. В ее основу было положено время развития аллергической реакции. Была выделена *гиперчувствительность немедленного типа* (ГНТ) и *гиперчувствительность замедленного типа* (ГЗТ). Сравнение свойств ГНТ и ГЗТ представлено в табл. 11.2.

**Таблица 11.2.** Свойства ГНТ и ГЗТ (по Куку, 1947)

| Показатель | ГНТ | ГЗТ |
|---|---|---|
| Время развития реакции | Менее 20–30 мин | Более 6–8 ч |
| Фактор индукции | Антитела | Т-лимфоциты |
| Фактор переноса в интактный организм | Пассивный (антителами) и адоптивный (иммунокомпетентными клетками) | Адоптивный (иммунокомпетентными клетками) |
| Десенсибилизация | Возможна | Невозможна |

К ГНТ были отнесены аллергические реакции, проявляющиеся уже через 20–30 мин после повторной встречи с аллергеном, тогда как реакции ГЗТ возникают через 6–8 ч и позже. Механизмы ГНТ связаны с выработкой специфических антител (опосредованы В-звеном иммунитета). ГНТ можно перенести от больного здоро-

вому введением специфических антител или клона антигенреактивных В-лимфоцитов. Возможна специфическая десенсибилизация пациента. ГЗТ опосредована клеточным звеном иммунитета. Перенос аллергизации от больного здоровому возможен только с лейкоцитарным пулом. Специфическая терапия, как правило, оказывается неэффективной.

ГНТ была описана в 1902–1905 гг. французскими учеными Ш. Рише и Ж. Портье и русским ученым Г.П. Сахаровым. Они показали, что ГНТ имеет стереотипное течение, которое может заканчиваться смертью. Она может проявляться в виде анафилаксии, атопических болезней, сывороточной болезни, феномена Артюса (см. раздел 12.4.3). Явление ГЗТ было установлено Р. Кохом (1890). Этот тип аллергии может протекать в виде контактной аллергии, реакции на кожно-аллергическую пробу, замедленной аллергии к белкам.

Изучение молекулярных механизмов аллергии привело к созданию Джеллом и Кумбсом в 1968 г. новой классификации. В соответствии с ней различают 4 основных типа аллергии: анафилактический (*I тип*), *цитотоксический* (*II тип*), *иммунокомплексный* (III тип) и опосредованный клетками (IV тип). Первые три типа относятся к ГНТ, четвертый к ГЗТ. Сравнительная характеристика механизмов указанных типов аллергии приведена в табл. 11.3.

**Таблица 11.3.** Классификация аллергических реакций по патогенезу (по Джеллу и Кумбсу, 1968)

| Тип реакции | Фактор патогенеза | Механизм патогенеза | Клинический пример |
|---|---|---|---|
| I<br>Анафилактический (ГНТ) | IgE, IgG4 | Образование рецепторного комплекса IgE (G4)–*FcR* тучных клеток и базофилов<br>Взаимодействие эпитопа аллергена с рецепторным комплексом<br>Активация тучных клеток и базофилов<br>Высвобождение медиаторов воспаления и других биологически активных веществ | Анафилаксия<br>Анафилактический шок<br>Полинозы |

*Окончание табл. 11.3*

| Тип реакции | Фактор патогенеза | Механизм патогенеза | Клинический пример |
|---|---|---|---|
| **II** Цитотоксический (ГНТ) | IgM, IgG | Выработка цитотоксических антител<br>Активация антителозависимого цитолиза | Лекарственная волчанка<br>Аутоиммунная гемолитическая болезнь<br>Аутоиммунная тромбоцитопения |
| **III** Иммунокомплексный (ГНТ) | IgM, IgG | Образование избытка иммунных комплексов<br>Отложение иммунных комплексов на базальных мембранах, эндотелии и в соединительнотканной строме<br>Активация АЗКЦТ<br>Запуск иммунного воспаления | Сывороточная болезнь<br>Системные заболевания соединительной ткани<br>Феномен Артюса<br>«Легкое фермера» |
| **IV** Клеточно-опосредованный (ГЗТ) | Т-лимфоциты | Сенсибилизация Т-лимфоцитов<br>Активация макрофага<br>Запуск иммунного воспаления | Кожно-аллергическая проба<br>Контактная аллергия<br>Белковая аллергия замедленного типа |

Примечание. Более подробное описание аллергических болезней см. в разделе 12.4.3.

Ведущую роль в запуске ГНТ играют антитела (IgE, G и M), а ГЗТ — лимфоидно-макрофагальная реакция.

Аллергическая реакция I типа связана с IgE и G4, названных *реагинами*. Они обладают цитофильностью — сродством к тучным клеткам и базофилам: соединение IgE или G4 с высокоаффинным *FcR* на поверхности этих клеток формирует специфический рецепторный комплекс, связывание с которым аллергена вызывает дегрануляцию базофила и тучной клетки — залповый выброс биологически активных соединений (гистамин, гепарин и др.), содержащихся в гранулах, в межклеточное пространство. Действие этих веществ практически мгновенно, но кратковременно, включает

ряд органотканевых патофизиологических реакций, связанных с сокращением гладкой мускулатуры кишечника, бронхов, мочевого пузыря и активацией секреторных, эндотелиальных и некоторых других клеток. В результате развиваются бронхоспазм, вазодилатация, отек и прочие симптомы, характерные для анафилаксии. Вырабатываемые цитокины стимулируют клеточное звено иммунитета к образованию $T_2$-хелперов и эозинофилогенез.

Наиболее ярко аллергическая реакция I типа проявляется клинической картиной анафилактического шока. Инъекция сыворотки крови больного аллергией I типа здоровому лицу переносит ему специфический реагин и делает на определенное время сенсибилизированным. На этом феномене основан механизм пробы Праусницца–Кюстнера, ранее использовавшейся для диагностики аллергии: контакт тест-пациента с аллергеном вызывал у него анафилаксию.

Аллергическая реакция II типа предполагает наличие цитотоксических антител (IgG, IgM), направленных к поверхностным структурам (антигенам) соматических клеток макроорганизма. Эти антитела связываются с клеточными мембранами клеток-мишеней и запускают различные механизмы антителозависимой цитотоксичности, которая сопровождается соответствующими клиническими проявлениями. Классическим примером является гемолитическая болезнь в результате резус-конфликта или переливания иногруппной крови.

Аллергическая реакция III типа обусловлена цитотоксическим действием избыточного количества иммунных комплексов, образующихся в организме пациента в большом количестве после введения массивной дозы антигена. Чрезмерное количество циркулирующих иммунных комплексов не может быть быстро утилизировано стандартными механизмами фагоцитирующих клеток. Фиксируясь на эндотелии сосудов и клубочков почек, в других тканях, иммунные комплексы инициируют АЗКЦТ, сопровождающуюся воспалительной реакцией. Клинические проявления аллергической реакции III типа, как правило, имеют отсроченную манифестацию, иногда на срок более 7 сут. Тем не менее этот тип реакции относят к ГНТ. Реакция может проявляться как одно из осложнений применения иммунных гетерологичных сывороток с лечебно-профилактической целью (*сывороточная болезнь*), а также при вдыхании белковой пыли («*легкое фермера*»).

**ГЗТ** представляет собой лимфоидно-макрофагальную реакцию, которая развивается в результате активации макрофагов под влиянием лимфоцитов, сенсибилизированных к аллергену. Основу ГЗТ составляют нормальные механизмы иммунного воспаления. Активация макрофага возможна в результате контактного или цитокинового воздействия. Контактная стимуляция — результат рецептор-лигандного взаимодействия макрофага, несущего рецепторную молекулу CD40, и $T_1$-хелпера, экспрессирующего CD40-лиганд. В исключительных случаях эту функцию может выполнять $T_2$-хелпер. Цитокиновая активация макрофага осуществляется γ-ИФН, который продуцируют $T_1$-хелперы, Т-киллеры или естественные киллеры. Кроме того, макрофаг может быть стимулирован ЛПС (через CD14-рецепторную молекулу). Ингибиторами активации макрофага являются иммуноцитокины $T_2$-хелпера: ИЛ-4, 10, 13 и др. Активация макрофага резко повышает его эффективность в осуществлении АЗКЦТ и иммунного фагоцитоза, т.е. деструкции и элиминации антигена (см. также раздел 12.4.3).

Лабораторная диагностика аллергии при аллергических реакциях I типа основана на выявлении суммарных и специфических реагинов (IgE, IgG4) в сыворотке крови пациента. При аллергических реакциях II типа в сыворотке крови определяют цитотоксические антитела (антиэритроцитарные, антилейкоцитарные, антитромбоцитарные и др.). При аллергических реакциях III типа в сыворотке крови выявляют иммунные комплексы. Для обнаружения аллергических реакций IV типа применяют кожно-аллергические пробы, которые широко используют в диагностике некоторых инфекционных заболеваний, паразитозов и микозов (туберкулез, лепра, бруцеллез, туляремия и др.).

Лечение аллергии основано на десенсибилизации макроорганизма путем индукции низкодозовой иммунологической толерантности (см. раздел 11.6), а также устранения аллергена из организма плазмаферезом, гемосорбцией, введением иммунных сывороток. В тяжелых случаях применяют глюкокортикоидную терапию.

Реакции гиперчувствительности имеют также большое значение и в норме. Их механизмы лежат в основе воспаления, которое способствует локализации инфекционного агента или иного антигена в пределах определенных тканей и формированию полноценной иммунной реакции защитного характера.

Реакции гиперчувствительности следует отличать от иммунного реагирования гиперергического типа, которое может быть обусловлено как вариациями нейрогуморальной регуляции, так и некоторыми врожденными особенностями. Например, новозеландскую черную линию мышей от рождения отличает гипериммуноглобулинемия, а среди рыжеволосых людей часто наблюдается эозинофилия.

## 11.5. Иммунологическая память

При повторной встрече с антигеном организм в норме формирует вторичный иммунный ответ — более активную и быструю иммунную реакцию. Этот феномен получил название *иммунологической памяти*. Иммунологическая память имеет высокую специфичность для конкретного антигена, распространяется как на гуморальное, так и клеточное звено иммунитета, обусловлена В- и Т-лимфоцитами и длительно сохраняется годами. Иммунологическая память — надежная гарантия защиты организма от повторных антигенных интервенций.

Существует два механизма формирования иммунологической памяти. Один из них предполагает длительное сохранение антигена в организме, что поддерживает в напряжении иммунную систему. Этому имеется множество примеров: инкапсулированный возбудитель туберкулеза, персистирующие вирусы кори, полиомиелита, ветряной оспы и некоторые другие патогены. Вероятно также наличие долгоживущих дендритных АПК, способных длительно сохранять и презентировать антиген.

Другой механизм предусматривает образование специальных *клеток иммунологической памяти* в процессе развития в организме продуктивного иммунного ответа. Эти клетки отличаются высокой специфичностью к конкретной антигенной детерминанте и большой продолжительностью жизни (до 10 лет). Они активно рециркулируют в организме, распределяясь в тканях и органах, что обеспечивает постоянную готовность иммунной системы реагировать на повторный контакт с антигеном по вторичному типу.

Феномен иммунологической памяти широко используется в практике вакцинации людей для создания напряженного иммунитета и поддержания его дительное время на защитном уровне. Осуществляют это 2—3-кратными прививками при первичной вак-

цинации и периодическими повторными введениями вакцинного препарата — *ревакцинациями* (см. главу 14).

Однако феномен иммунологической памяти имеет и отрицательные стороны. Например, повторная попытка трансплантировать уже однажды отторгнутую ткань вызывает быструю и бурную реакцию — *криз отторжения*.

## 11.6. Иммунологическая толерантность

*Иммунологическая толерантность* — отсутствие специфического продуктивного иммунного ответа организма на антиген в связи с неспособностью его распознавания. В отличие от иммуносупрессии иммунологическая толерантность предполагает изначальную ареактивность к определенному антигену.

Собственно феномен иммунологической толерантности был открыт в 1953 г. независимо чешским ученым М. Гашеком и группой английских исследователей во главе с П. Медаваром. Гашек в опытах на куриных эмбрионах, а Медавар на новорожденных мышах показали, что организм становится нечувствительным к антигену при его введении в эмбриональном или раннем постнатальном периоде.

Иммунологическую толерантность вызывают антигены, которые получили название *толерогенов*. Ими могут быть практически все вещества, однако наибольшей толерогенностью обладают полисахариды.

Иммунологическая толерантность бывает врожденной и приобретенной. Примером *врожденной толерантности* является отсутствие реакции иммунной системы на свои собственные антигены. *Приобретенную толерантность* можно создать путем введения антигена в эмбриональном периоде или в первые дни после рождения индивидуума.

Иммунологическая толерантность отличается специфичностью — она направлена к строго определенным антигенам. По степени распространенности различают поливалентную и расщепленную толерантность. *Поливалентная иммунологическая толерантность* возникает одновременно на все антигенные детерминанты, входящие в состав конкретного антигена. Для *расщепленной*, или *моновалентной*, *толерантности* характерна избирательная невосприимчивость каких-то отдельных антигенных детерминант.

Степень проявления иммунологической толерантности существенно зависит от ряда свойств макроорганизма и толерогена. Так, на проявление толерантности влияют возраст и состояние иммунореактивности организма. Иммунологическую толерантность легче индуцировать в эмбриональном периоде и в первые дни после рождения, лучше всего она проявляется у животных со сниженной иммунореактивностью и с определенным генотипом.

Успешность индукции иммунологической толерантности зависит от степени чужеродности антигена для организма, его природы, дозы препарата и продолжительности воздействия антигена на организм. Наибольшей толерогенностью обладают наименее чужеродные по отношению к организму антигены, имеющие малую молекулярную массу и высокую гомогенность. Легче всего формируется толерантность на тимуснезависимые антигены, например бактериальные полисахариды.

Различают высокодозовую и низкодозовую толерантность. *Высокодозовую толерантность* вызывают введением больших количеств высококонцентрированного антигена. При этом наблюдается прямая зависимость между дозой вещества и производимым им эффектом. *Низкодозовая толерантность*, наоборот, вызывается очень малым количеством высокогомогенного молекулярного антигена. Соотношение доза—эффект в этом случае имеет обратную зависимость.

В эксперименте толерантность возникает через несколько дней, а иногда часов после введения толерогена и, как правило, проявляется в течение всего времени, пока он циркулирует в организме. Эффект ослабевает или прекращается с удалением из организма толерогена. Обычно иммунологическая толерантность наблюдается непродолжительное время — всего несколько дней. Для ее пролонгирования необходимы повторные инъекции препарата.

Механизмы толерантности многообразны и до конца не расшифрованы. Известно, что ее основу составляют нормальные процессы регуляции иммунной системы. Выделяют три наиболее вероятных причины развития иммунологической толерантности: элиминация из организма антигенспецифических клонов лимфоцитов; блокада биологической активности иммунокомпетентных клеток; быстрая нейтрализация антигена антителами.

Элиминации, или делеции, подвергаются, как правило, клоны аутореактивных Т-лимфоцитов на ранних стадиях их онтогене-

за. Активация антигенспецифического рецептора *TCR* незрелого лимфоцита индуцирует в нем апоптоз. Этот феномен, обеспечивающий в организме ареактивность к аутоантигенам, получил название *центральной толерантности. Локальную толерантность* к забарьерным антигенам обеспечивают тканевые естественные киллеры, устраняющие сенсибилизированные к этим антигенам Т-лимфоциты.

Основная роль в блокаде биологической активности иммунокомпетентных клеток принадлежит иммуноцитокинам. Воздействуя на соответствующие рецепторы, они способны вызвать ряд негативных эффектов. Например, пролиферацию Т- и В-лимфоцитов активно тормозит β-ТФР. Дифференцировку Т0-хелпера в $T_1$ можно заблокировать при помощи ИЛ-4, 13, а в $T_2$-хелпер — γ-ИФН. *Биологическая активность макрофагов ингибируется продуктами* $T_2$-хелперов (ИЛ-4, 10, 13, β-ТФР и др.).

Биосинтез в В-лимфоците и его превращение в плазмоцит подавляются свободно циркулирующими IgG. Быстрая инактивация молекул антигена антителами предотвращает их связывание с рецепторами иммунокомпетентных клеток — элиминируется специфический активирующий фактор. Возможен адоптивный перенос иммунологической толерантности интактному животному путем введения ему иммунокомпетентных клеток, взятых от донора.

Феномен иммунологической толерантности имеет большое практическое значение. Он используется для решения многих важных проблем медицины, таких, как пересадка органов и тканей, подавление аутоиммунных реакций, лечение аллергий и других патологических состояний, связанных с агрессивным поведением иммунной системы.

*Толерантность можно искусственно отменить.* Для этого необходимо активировать иммунную систему адъювантами, интерлейкинами или переключить направленность ее реакции иммунизацией модифицированными антигенами. Другой путь — удалить из организма толероген, сделав инъекцию специфических антител или путем иммуносорбции.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

А. Назовите класс Ig, который проходит через плаценту:
1. IgA.
2. IgG.
3. IgM.
4. IgE.

Б. Назовите класс Ig, который является показателем острой инфекции:
1. IgA.
2. IgG.
3. IgM.
4. IgE.

В. Назовите класс Ig, который обеспечивает местный иммунитет:
1. IgA.
2. IgG.
3. IgM.
4. IgE.

Г. Отметьте свойства, характерные для IgE:
1. Связывает комплемент.
2. Обладает цитофильностью к тучным клеткам и базофилам.
3. Участвует в развитии гиперчувствительности I типа.
4. Проходит через плаценту.

Д. Назовите класс Ig, обладающий наибольшей авидностью:
1. IgA.
2. IgG.
3. IgM.
4. IgE.

Е. Назовите клетки, обеспечивающие АЗКЦТ:
1. Кровяные ЕК.
2. Т-киллеры.
3. Эозинофилы.
4. Активированные макрофаги.

Ж. Отметьте типы гиперчувствительости, классифицированные по Джеллу и Кумбсу, в которых принимает участие комплемент:
1. I тип (анафилактичский).
2. II тип (цитотоксический).
3. III тип (иммунокомплексный).
4. IV тип (ГЗТ).

**З**. Назовите процесс, защищающий организм от повторных антигенных интервенций:

1. Иммунная толерантность.
2. Иммунная память.
3. Гиперчувствительность.
4. Иммунный паралич.

**И**. К аллергологу обратилась пациентка, у которой через 48 ч после употребления косметического крема кожа лица воспалилась и на ней появились везикулы. Этим кремом пациентка пользовалась и ранее. Врач диагностировал развитие контактной гиперчувствительности. Объясните механизм развития контактной гиперчувствительности. Назовите тип, к которому она относится.

**К**. Резус-отрицательной матери, беременной первой беременностью резус-положительным плодом, сразу после родов была введена антирезус-сыворотка. Объясните необходимость проведения этой врачебной манипуляции.

**Л**. Иммунная толерантность проявляется отсутствием специфического продуктивного иммунного ответа на антиген в связи с неспособностью его распознавания. Назовите антигены, к которым легче всего формируется толерантность.

# Глава 12

# ОСОБЕННОСТИ ИММУНИТЕТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЛОКАЛИЗАЦИЯХ И СОСТОЯНИЯХ

## 12.1. Особенности местного иммунитета

Местный иммунитет формируется в пределах кожных покровов и слизистых оболочек, непосредственно контактирующих с окружающей средой и наиболее вероятных входных ворот экзогенных антигенов, и защищает их. Факторы местного иммунитета могут действовать экстракорпорально — выходить за пределы макроорганизма на поверхность кожных покровов и выделяться или мигрировать в секрет слизистых оболочек. Концепцию местного иммунитета впервые высказал А.М. Безредка (1919).

Система местного иммунитета функционирует достаточно обособленно и имеет ряд особенностей. Между общим и местным иммунитетом существует тесная связь. Во-первых, система общего иммунитета является резервным источником факторов защиты. Во-вторых, при развитии инфекционного процесса отчетливо прослеживается переход местной иммунной реактивности в общую. В-третьих, между этими двумя системами постоянно осуществляется обмен факторами иммунитета (антитела, клоны антигенореактивных лимфоцитов и др.), что важно для распространения по всему организму иммунологической памяти (см. раздел 11.5).

### 12.1.1. Иммунитет кожи

Кожа выполняет функцию механической защиты — она предохраняет макроорганизм от внешних воздействий и в случае повреждения способна самостоятельно восстановить свою целостность. Она также является фактором физико-химической защиты — продукты потовых и сальных желез обладают бактерицидностью. Кроме того, в коже эффективно действует система местного иммунитета.

Внешний слой кожи, *эпидермис*, формируется эпителиальными клетками — кератиноцитами. В его толще встречаются дендритные клетки двух типов: *клетки Лангерганса* и *Гринстейна*. В дерме и эпидермисе локализуются лимфоциты и тучные клетки. Лимфоидная популяция представлена в основном $Т_2$-хелперами и Т-киллерами. В дерме и эпидермисе происходит дифференцировка незрелых Т-лимфоцитов в зрелые клетки.

*Кератиноциты* — немигрирующие эпителиальные клетки, выполняющие в коже барьерную и иммунорегуляторную функции. Они экспрессируют МНС II класса, ко-стимулирующие молекулы CD40, 80, 86 и *Fas*-лиганд. Клетки синтезируют широкий спектр цитокинов: ИЛ-1, 6, 7, 8, ФНО, β-ТФР, ГМ-КСФ, α,β-ИФН и др.

Неактивированные кератиноциты обеспечивают только барьерную функцию. Повреждающие воздействия (травма, ожог, воспаление и пр.) или иммуноцитокиновая стимуляция активируют кератиноциты, и они становятся способными презентировать антиген Т-хелперам, запускать антительный иммунный ответ и подавлять местную клеточную пролиферацию иммунных лимфоцитов.

*Клетки Лангерганса*, или белые отростчатые эпидермоциты — мигрирующие дендритные клетки миелоидной природы. Происходят из клеток костного мозга или циркулирующих моноцитов. Продолжительность жизни около 20 сут, чувствительны к УФ-излучению. Экспрессируют на клеточной мембране МНС II класса, CD4, 40, синтезируют ИЛ-1, 12, α,β-ИФН, ГМ-КСФ, хемокины.

В дерме клетки Лангерганса способны захватывать и процессировать антиген, но не могут выполнять функции АПК, так как не экспрессируют ко-стимулирующие факторы — молекулы CD80, 86. После активации продуктами воспаления или цитокинами захватившая антиген клетка Лангерганса мигрирует с током лимфы в регионарные лимфоузлы. Там она дифференцируется в зрелую дендритную клетку — интердигитальную клетку лимфоузлов и экспрессирует недостающие молекулы CD80, 86, а также начинает синтезировать цитокины. Интердигитальная клетка теряет способность захватывать и процессировать антиген, но при этом превращается в эффективную АПК. Она активирует Т-хелперы и запускает специфический антительный иммунный ответ и формирование иммунологической памяти.

Разобщение в пространстве и времени индукции в коже специфического иммунного ответа сопрягает систему местного и общего

иммунитета, обеспечивает генерализацию защитного реагирования и формирвание иммунологической памяти. В случае инактивации клеток Лангерганса (например, УФ-облучением) функции АПК в коже начинают выполнять кератиноциты и клетки Гринстейна, однако они потенцируют иммуносупрессию — угнетение кожной иммунореактивности.

Антитела в коже не имеют большого значения, развивается преимущественно клеточный иммунный ответ. Напряженность местного иммунитета в коже, так же как и интегральное состояние клеточного звена иммунитета в целом, характеризуется кожно-аллергическими пробами.

### 12.1.2. Иммунитет слизистых оболочек

Сами эпителиальные клетки представляют собой хороший механический барьер, препятствующий инвазии патогенов. Секрет слизистых оболочек также выполняет функции физико-химического барьера (см. раздел 9.2.1.1), а нормальная микрофлора, населяющая слизистые оболочки, — биологического, так как обеспечивают колонизационную резистентность (см. раздел 9.2.1.2). Система местного иммунитета слизистых оболочек отличается развитой лимфоидной тканью и высокой насыщенностью иммунокомпетентными клетками.

Лимфоидный состав слизистых оболочек имеет характерные особенности, обусловленные его формированием. Различают раннюю (реликтовую) и позднюю (современную) компоненты. *Ранняя компонента* представлена γδТ- и В1-лимфоцитами, которые рано отселяются в периферические лимфоидные образования прямо из костного мозга и в дальнейшем развиваются автономно от центральных органов иммунной системы. Антигенные рецепторы этих клеток отличаются относительно низкой аффинностью, но обладают достаточно широким спектром чувствительности. Это позволяет им обеспечить первую линию защиты от микробной агрессии и необходимую отсрочку для активации поздней компоненты.

Клетки *поздней компоненты* развиваются под контролем центральных органов иммунной системы. К их числу относятся традиционные αβТ- и $CD5^-$ В-лимфоциты, обладающие высокой специфичностью и аффинностью рецепторного аппарата. Эти клетки обеспечивают высокоэффективный специфический иммунный ответ и формируют вторую линию иммунной защиты в слизистых оболочках.

Наиболее ярким примером организации иммунной защиты слизистых оболочек является высокоразвитая лимфоидная система желудочно-кишечного тракта, в которой различают две функциональных зоны — индуктивную и эффекторную. Индуктивная зона сформирована лимфоидными фолликулами (в том числе аппендикса, пейеровых бляшек), состоящими из равных количеств Т- и В-лимфоцитов. В индуктивной зоне идентифицируются области преимущественного расселения Т- и В-лимфоцитов. В В-области располагается герминативный (зародышевый) центр, где размножаются и созревают В-лимфоциты, в основном IgA-продуценты. Т-популяция на 2/3 представлена Т-киллерами и на 1/3 — Т-хелперами. Обнаруживаются также макрофаги и дендритные клетки. В этой зоне осуществляются презентация и распознавание антигена, индукция иммунного реагирования, формирование клонов антигенспецифических Т-и В-лимфоцитов, дифференцировка В-лимфоцитов в IgA-продуценты.

Помощь в презентации антигена оказывают М-клетки эпителия. Они захватывают молекулы антигена в просвете органа и путем трансцитоза переносят его к АПК.

*Эфферентная зона* охватывает околоэпителиальную область и *lamina propria*. В околоэпителиальной области находятся популяция интраэпителиальных лимфоцитов, которая на 3/4 состоит из Т-киллеров, а также γδТ-лимфоциты. Они обеспечивают функцию иммунологического надзора за быстроразмножающимся эпителием. Антиген могут презентировать энтероциты, которые в активированном состоянии экспрессируют МНС II класса, синтезируют цитокины и хемокины (ИЛ-8). Однако энтероциты являются неклассическими АПК.

В *lamina propria* обнаруживается много Т- и В-лимфоцитов, макрофагов и естественных киллеров. На долю Т-лимфоцитов приходится до 60% всей лимфоидной популяции. На 2/3 это Т-хелперы, остальные клетки — Т-киллеры, в том числе γδТ-лимфоциты. Доля В-лимфоцитов составляет 40%, половина из них — это В1-клетки. Подавляющее большинство антителопродуцентов (80%) синтезирует полимерные молекулы IgA. В этой области развивается антительный ответ. Идет интенсивный биосинтез иммуноглобулинов, в основном класса А, которые действуют как в пределах самих тканей, так и в составе секрета слизистых оболочек, куда поступают в результате направленного транспорта (sIg) или диффузии.

Фагоцитирующие клетки, содержащиеся в собственной пластинке, способны совершать маятникообразные перемещения. Привлеченные хемоаттрактантами, они могут выходить через эпителий в просвет полого органа (кишки, бронха, ротовой полости и т.д.) и возвращаться обратно.

В пределах слизистых оболочек обнаруживается много тучных клеток и эозинофилов. Синтезируя вазоактивные амины (тучные клетки), токсины (эозинофилы), ферменты, иммуноцитокины, липидные медиаторы и другие биологически активные вещества, они участвуют в регуляции иммунной и воспалительной реакций в пределах ткани. В случае гиперпродукции IgE и особой генетической предрасположенности тучные клетки потенцируют развитие аллергической реакции I типа (анафилаксию).

*12.1.2.1. Особенности иммунитета ротовой полости*

Система иммунной защиты ротовой полости удачно сочетает разнообразные неспецифические и специфические факторы, обеспечивающие эффективную защиту от кариесогенных и иных болезнетворных микробов.

Клетки слизистой оболочки выполняют функции механического барьера. Особое значение имеет антимикробная активность слюны. В течение суток в организме взрослого человека вырабатывается до 2 л слюны — секрета с выраженной ферментативной активностью. Это не только мощный физико-химический, но и биологический барьер. Слюна содержит широкий набор веществ, обладающих выраженными бактерицидными свойствами: лизоцим, лактоферрин, лактопероксидаза, отдельные компоненты комплемента и пр. В слюне также постоянно присутствует до 200 000 фагоцитирующих клеток. В соединительнотканной строме ротовой полости также обнаруживаются клеточные элементы неспецифической резистентности: активно мигрирующие тканевые макрофаги, фибробласты, гранулоциты и тучные клетки.

Система специфической иммунной защиты ротовой полости представлена мощными миндалинами глоточного кольца, хорошо развитой системой лимфоидного дренирования в подчелюстных, подъязычных, околоушных и шейных лимфоузлах. В тканях обнаруживаются лимфоидные скопления, а в слюне — лимфоциты и широкий спектр иммуноглобулинов. Количественно доминирует IgA. Здесь его содержится заметно больше, чем в сыворотке крови. Наибольшую функциональную нагрузку несет секреторная форма

IgA (*s*IgA). Содержание IgM, G и E в слюне несколько меньше, чем в сыворотке крови. Снижение содержания в слюне иммуноглобулинов, особенно IgA, чревато гнойно-воспалительными или аллергическими заболеваниями слизистой оболочки ротовой полости.

## 12.2. Особенности иммунитета при различных состояниях

Макроорганизм имеет широкий спектр средств защиты своей целостности и поддержания гомеостаза. Однако для минимизации энергетических и пластических затрат макроорганизм для устранения конкретного антигена использует лишь наиболее эффективные механизмы и факторы защиты. Поэтому при воздействии различных по природе и свойствам антигенов иммунное реагирование макроорганизма имеет свои особенности.

### 12.2.1. Особенности иммунитета при бактериальных инфекциях

Иммунная реакция макроорганизма в ответ на бактериальную инфекцию в значительной степени определяется факторами патогенности микроба и в первую очередь его способностью к токсинообразованию. Различают иммунитет *антибактериальный* — против структурных компонентов бактериальной клетки и *антитоксический* — против белковых токсинов.

Основными факторами антибактериальной защиты являются антитела и фагоциты. Антитела эффективно инактивируют биологически активные молекулы бактериальной клетки (токсины, ферменты агрессии и др.), маркируют их, запускают антителозависимый бактериолиз и иммунный фагоцитоз. Фагоциты непосредственно осуществляют фагоцитоз, в том числе иммунный, антителозависимый бактериолиз и внеклеточный киллинг патогена при помощи ион-радикалов и ферментов. Важная роль в борьбе с грамположительными микробами принадлежит лизоциму, а с грамотрицательными — комплементу (альтернативный путь активации), кроме того, существенное значение имеют белки острой фазы (С-реактивный и маннозосвязывающий протеин).

Ряд бактерий, относящихся к факультативным внутриклеточным паразитам, отличается повышенной устойчивостью к действию комплемента, лизоцима и фагоцитов (незавершенный фаго-

цитоз). К их числу относятся микобактерии, йерсинии, бруцеллы, сальмонеллы и некоторые другие. В такой ситуации макроорганизм вынужден переключать нагрузку на клеточное звено иммунитета, что ведет к аллергизации организма по механизму ГЗТ. Особое значение приобретают активированные макрофаги и естественные киллеры, осуществляющие АЗКЦТ, а также $\gamma\delta$Т-лимфоциты.

Напряженность специфического антибактериального иммунитета оценивают в серологических тестах по титру или динамике титра специфических антител, а также по состоянию клеточной иммунореактивности (например, по результатам кожно-аллергической пробы).

### 12.2.2. Особенности противовирусного иммунитета

Особенности иммунной защиты макроорганизма при вирусных инфекциях обусловлены двумя формами существования вируса: внеклеточной и внутриклеточной. Основными факторами, обеспечивающими противовирусный иммунитет, являются специфические антитела, Т-киллеры, естественные киллеры, интерферон и сывороточные ингибиторы вирусных частиц.

Специфические противовирусные антитела способны взаимодействовать только с внеклеточным вирусом, так как у них нет доступа внутрь живой клетки. Антитела нейтрализуют вирусные адгезины и нейраминидазы, препятствуя адсорбции вирусов на клетках-мишенях и их инфицированию. Они также связывают вирусные белки и нуклеиновые кислоты, образовавшиеся после разрушения зараженных вирусами клеток. Сформировавшиеся иммунные комплексы элиминируются путем иммунного фагоцитоза. Специфическое связывание антител с вирусными белками, экспрессированными на цитоплазматической мембране инфицированных клеток, индуцирует естественные киллеры к АЗКЦТ (см. раздел 11.3.1).

Клетки, инфицированные вирусом и приступившие к его репликации, экспрессируют вирусные белки на цитоплазматической мембране в составе молекул антигенов гистосовместимости — MHC I класса (см. раздел 10.1.4.2). Измененная структура MHC I класса этих антигенов гистосовместимости является маркером для Т-киллеров, которые распознают зараженные вирусом клетки и уничтожают их (см. раздел 11.3.2).

Мощным противовирусным свойством обладает интерферон (*см. раздел 9.2.3.4*). Он не действует непосредственно на внутриклеточный вирус, а связывается с рецептором на мембране клетки и подавляет в ней все биосинтетические процессы.

Сывороточные ингибиторы неспецифически связываются с вирусной частицей и нейтрализуют ее, препятствуя тем самым адсорбции вируса на клетках-мишенях.

Напряженность противовирусного иммунитета оценивают преимущественно в серологических тестах по нарастанию титра специфических антител в парных сыворотках в процессе болезни. Определяют также концентрацию интерферона в сыворотке крови.

### 12.2.3. Особенности противогрибкового иммунитета

Антигены грибов имеют относительно низкую иммуногенность: они практически не индуцируют антителообразование (титры специфических антител остаются низкими), но стимулируют клеточное звено иммунитета. Основными действующими факторами противогрибкового иммунитета являются активированные макрофаги, которые осуществляют АЗКЦТ грибов.

При микозах наблюдается аллергизация макроорганизма. Кожные и глубокие микозы сопровождаются, как правило, ГЗТ. Грибковые поражения слизистых оболочек дыхательных и мочеполовых путей вызывают аллергизацию по механизму ГНТ (реакция I типа). Напряженность противогрибкового иммунитета оценивается по результатам кожно-аллергических проб с грибковыми аллергенами.

### 12.2.4. Особенности иммунитета при протозойных инвазиях

*Паразитарная инвазия сопровождается формированием* в макроорганизме гуморального и клеточного иммунитета. В крови определяются специфические антитела классов M и G, которые чаще всего не обладают протективным свойством. Однако они активируют АЗКЦТ с участием макрофагов, а в случае внутриклеточного паразитирования — естественных киллеров и γδТ-лимфоцитов. Паразитарные инвазии соспровождаются аллергизацией макроорганизма по механизму ГЗТ.

Характер противопаразитарного иммунитета определяется биологическими особенностями паразита. Многие паразиты обладают

высокой антигенной изменчивостью, что позволяет им избегать действия факторов иммунитета. Например, каждой стадии развития малярийного плазмодия соответствуют свои специфические антигены.

Напряженность противопаразитарного иммунитета оценивается в серологических тестах по титру специфических антител и в кожно-аллергических пробах с протозойным антигеном.

### 12.2.5. Особенности противоглистного иммунитета

Ведущую роль в осуществлении иммунной защиты макроорганизма от глистной инвазии играют эозинофилы, которые осуществляют АЗКЦТ. Эти клетки распознают паразитов, отмеченных специфическими IgE или IgA. Активированный эозинофил выделяет путем дегрануляции ряд токсичных субстанций (ферменты, белковые токсины), губительно действующих на гельминты.

Антигены гельминта, связываясь также с рецепторными комплексами тучных клеток слизистой оболочки, вызывают их дегрануляцию. Экскретированные биологически активные соединения вызывают интенсивную перистальтику, удаляющую паразита или его останки из просвета кишки.

Эозинофилы и тучные клетки синтезируют цитокины и липидные медиаторы, потенцирующие воспалительную реакцию в месте внедрения гельминта. Глистная инвазия сопровождается аллергизацией в основном по механизму ГЗТ.

### 12.2.6. Трансплантационный иммунитет

Макроорганизм формирует иммунную реакцию, направленную против пересаженной в него чужеродной ткани (трансплантата). Это является основной проблемой, препятствующей успешной пересадке органов и тканей. Иммунная реакция на чужеродные клетки и ткани обусловлена тем, что в их составе содержатся генетически чужеродные для организма антигены. Эти антигены получили название трансплантационных или антигенов гистосовместимости (см. раздел 10.1.4.2). Наиболее полно они представлены на цитоплазматической мембране клеток.

Реакция отторжения не возникает в случае полной совместимости донора и реципиента по антигенам гистосовместимости — такое возможно лишь для однояйцовых близнецов. Выраженность

реакции отторжения во многом зависит от степени чужеродности, объема трансплантируемого материала и состояния иммунореактивности реципиента.

На чужеродные трансплантационные антигены организм реагирует факторами клеточного и гуморального иммунитета. Основным являются Т-киллеры и специфические антитела. Т-киллеры осуществляют АНКЦТ тканей трансплантата (реакция реципиент против трансплантата) или реципиента (реакция трансплантат против реципиента). Специфические антитела, которые образуются к антигенам трансплантата, запускают комплемент- или клеточно-опосредованный цитолиз трансплантата.

Возможен адоптивный перенос трансплантационного иммунитета с помощью активированных лимфоцитов или со специфической антисывороткой от сенсибилизированной особи интактному макроорганизму.

Механизм иммунного отторжения пересаженных клеток и тканей имеет две фазы. В первой фазе вокруг трансплантата и сосудов наблюдается скопление иммунокомпетентных клеток (лимфоидная инфильтрация), в том числе Т-киллеров. Во второй фазе происходит деструкция клеток трансплантата Т-киллерами, активируются макрофагальное звено, естественные киллеры, специфический антителогенез. Затем возникают иммунное воспаление, тромбоз кровеносных сосудов, нарушается питание трансплантата и происходит его гибель. Разрушенные ткани утилизируются фагоцитами. Ткани трансплантата реагируют на ткани реципиента подобным же образом. Однако иммунная реакция трансплантата слабее, так как ограничена его ресурсами.

В процессе реакции отторжения формируется клон клеток иммунологической памяти. Повторная попытка пересадки тех же органов и тканей вызывает вторичный иммунный ответ, который протекает очень бурно и быстро заканчивается отторжением трансплантата.

### 12.2.7. Иммунитет против новообразований

*Противоопухолевый иммунитет* имеет свои особенности, связанные с низкой иммуногенностью раковых клеток. Эти клетки практически не отличаются от нормальных, интактных морфологических элементов собственного организма. Специфический антигенный репертуар опухолевых клеток также скуден. В число

опухольассоциированных антигенов (см. раздел 10.1.4.3) входят группа раково-эмбриональных антигенов, продукты онкогенов, некоторые вирусные антигены и гиперэкспрессируемые нормальные белки. Слабому иммунологическому распознаванию опухолевых клеток способствуют отсутствие воспалительной реакции в месте онкогенеза, их иммуносупрессивная активность — биосинтез ряда негативных цитокинов (β-ТФР и др.), а также экранирование раковых клеток противоопухолевыми антителами.

Механизм противоопухолевого иммунитета до сих пор слабо изучен. Считается, что основную роль в нем играют активированные макрофаги, определенное значение имеют также естественные киллеры. Защитная функция гуморального иммунитета во многом спорная — специфические антитела могут экранировать антигены опухолевых клеток, не вызывая их цитолиза.

В последнее время получила распространение иммунодиагностика рака, которая основана на определении в сыворотке крови раково-эмбриональных и опухольассоциированных антигенов. Так, в настоящее время удается диагностировать некоторые формы рака печени, желудка, кишечника, простаты и др.

Между состоянием иммунной защиты и развитием новообразований существует тесная связь. Злокачественные новообразования наблюдаются чаще у индивидуумов с иммунодефицитами и престарелых (в связи с понижением активности иммунной системы). Иммуносупрессивная химиотерапия также нередко сопровождается пролиферативными процессами. Поэтому в лечении опухолей нашли применение иммуномодуляторы (интерлейкины, интерфероны), а также адъюванты (мурамилдипептиды, вакцина БЦЖ и др.).

### 12.2.8. Иммунология беременности

Беременность напрямую сопряжена с феноменом иммунологической толерантности. В организме беременной формируется целый комплекс факторов, обеспечивающих ареактивность иммунной системы матери к гетероантигенам плода. Во-первых, синцитиотрофобласт плаценты «невидим» для рецепторов иммунокомпетентных клеток. Он не экспрессирует классические молекулы гистосовместимости, а только неполиморфные, трудно распознаваемые. Во-вторых, синцитиотрофобласт синтезирует иммуносупрессорные цитокины (ИЛ-4, 10, β-ТФР). В-третьих, в децидуальной оболочке беременной матки располагаются $CD16^-$

CD56$^{много}$ естественные киллеры (см. раздел 11.3.2), которые устраняют активированные аллоантигенами плода лимфоциты путем индукции у них апоптоза.

## 12.3. Иммунный статус и его оценка

Иммунный статус — это совокупность всех параметров иммунной системы, с помощью которых осуществляются распознавание и элиминация из организма чужеродных субстанций антигенной природы. Изучение иммунного статуса является важной составной частью клинической иммунологии. Задачей клинической иммунологии являются диагностика, лечение и профилактика заболеваний иммунной системы. Оценка иммунного статуса проводится с целью иммунодиагностики, т.е. идентификации нарушенного звена иммунной системы, от которого зависит развитие заболевания. Выделяют 4 группы заболеваний иммунной системы: иммунодефициты, аутоиммунные, аллергические и лимфопролиферативные заболевания. Прежде всего иммунодиагностика, как и любая лабораторная диагностика, направлена на подтверждение клинического диагноза. Наибольшую значимость иммунодиагностика имеет при иммунодефицитах, которые подразделяют на первичные и вторичные. Первичные иммунодефициты являются следствием наличия в организме генетического дефекта. На основании клинической картины можно предполагать, какое звено иммунной системы поражено: фагоцитоз, гуморальный или клеточный иммунитет. Но точное установление клинического диагноза при первичных иммунодефицитах возможно только при проведении иммунодиагностики, включающей иммуногенетическое исследование. Так, поставить диагноз хронической гранулематозной болезни можно только при изучении способности лейкоцитов крови образовывать активные формы кислорода, а Х-сцепленной агаммаглобулинемии — только при определении уровня иммуноглобулинов в крови больного. При первичных иммунодефицитах иммунодиагностика имеет решающее значение в установлении клинического диагноза.

Впервые методология иммунодиагностики заболеваний иммунной системы была разработана Р.В. Петровым с соавт., опубликовавших в 1984 г. методические рекомендации «Оценка иммунного статуса человека». В соответствии с этими методическими рекомендациями все методы иммунодиагностики подразделены на те-

сты I и II уровня (табл. 12.1). Тесты I уровня направлены на идентификацию грубых поломок иммунной системы, т.е. первичных иммунодефицитов. Тесты II уровня направлены на углубленное изучение функционального состояния иммунной системы. Например, определение функционального состояния Т- и В-клеток с помощью реакции бластной трансформации с митогенами и специфическими антигенами; определение их способности синтезировать различные цитокины и др. Другими словами, к тестам II уровня можно отнести любые методы и подходы, направленные на вскрытие механизмов поломок в иммунной системе, ведущие к развитию заболевания.

**Таблица 12.1.** Тесты для оценки иммунного статуса

| Тесты I уровня | Тесты II уровня |
|---|---|
| Определение количества, Т- и В-лимфоцитов в периферической крови, абс. и % | Гистохимический анализ лимфоидных органов |
| Кластерный анализ | Анализ поверхностных маркеров мононуклеарных клеток с использованием моноклональных антител |
| Определение уровня сывороточных иммуноглобулинов классов M, G, A, D, E | Бласттрансформация В- и Т-лимфоцитов |
| Определение фагоцитарной активности лейкоцитов | Определение цитотоксичности |
| Кожные аллергические тесты | Определение активности ферментов, ассоциированных с иммунной недостаточностью |
| Рентгенография и рентгеноскопия лимфоидных органов, а также других внутренних органов (прежде всего легких) в зависимости от клинических показаний | Определение синтеза и секреции цитокинов |
| | Определение уровня гормонов тимуса |
| | Анализ респираторного взрыва фагоцитов |
| | Определение различных компонентов комплемента |
| | Анализ смешанных клеточных культур |

В настоящее время для оценки иммунного статуса рекомендуется следующий минимальный набор тестов (Хаитов Р.М. и соавт., 2009):

- *фагоцитоз*: определение поглотительной и бактерицидной (внутриклеточной гибели поглощенных микробов) активности лейкоцитов периферической крови человека; идентификация образования лейкоцитами активных форм кислорода;
- *комплемент*: определение гемолитической активности сыворотки (плазмы) крови;
- *иммуноглобулины*: определение в сыворотке (плазме) уровня IgG, IgA, IgM и IgE;
- субпопуляции *лимфоцитов*: количественное и процентное содержание в периферической крови $CD3^+$, $CD4^+$, $CD8^+$, $CD19^+$ (или $CD20^+$) лимфоцитов, а также при показаниях $CD16^+$- и *HLA*-$DR^+$-лимфоцитов.

Минимальным набором тестов должны быть вооружены все лаборатории и центры клинической иммунологии, входящие в систему иммунологической службы Российской Федерации, а также группы клинической иммунологии при клинико-диагностических лабораториях республиканских, краевых и областных клинических больниц. С помощью минимального набора тестов можно осуществить иммунодиагностику основных первичных иммунодефицитов человека. Хотя последние встречаются относительно редко (1:100 000–150 000), в большинстве случаев они протекают достаточно тяжело и требуют безотлагательных лечебных мероприятий. Как правило, минимальный набор тестов недостаточен для выявления причин вторичной иммунной недостаточности. В этом случае требуется использовать более сложный набор тестов II уровня, который для каждого конкретного случая должен быть строго индивидуален.

## 12.4. Патология иммунной системы

Расстройства иммунной системы бывают двух видов: иммунная недостаточность или иммунодефициты, когда имеется дефект, т.е. отклонение в показателях одного или нескольких механизмов иммунного ответа; излишняя активация иммунных механизмов, ведущая к развитию аллергических или аутоиммунных болезней. Обособленно стоят иммунопролиферативные заболевания.

## 12.4.1. Иммунодефициты

Иммунодефициты — нарушения иммунного статуса, обусловленные дефектом одного или нескольких механизмов иммунного ответа.

Различают первичные (врожденные) и вторичные (приобретенные) иммунодефициты.

Клиническая картина различных иммунодефицитов сходная. Иммунодефициты не имеют характерных клинических симптомов и сопровождаются инфекционными осложнениями; гематологическими нарушениями; желудочно-кишечными расстройствами; аутоиммунными процессами; опухолями; аллергическими реакциями; врожденными пороками развития.

Диагностику иммунодефицитов проводят на основании анамнеза (частые инфекционные заболевания, опухоли, аутоиммунные процессы, аллергия и др.), клинических симптомов (оппортунистическая инфекция, аллергия, опухоли, состояние лимфоузлов, пороки развития и др.), а также результатов тестов *in vitro* и *in vivo*, морфологических исследований (гистологические исследования центральных и периферических органов иммунной системы).

### *12.4.1.1. Первичные врожденные иммунодефициты*

Врожденные иммунодефицитные синдромы и заболевания — довольно редкое явление. Причинами врожденных иммунодефицитов могут быть удвоение хромосом, точечные мутации, дефект ферментов обмена нуклеиновых кислот, генетически обусловленные нарушения мембран, повреждения генома в эмбриональном периоде и др. Первичные иммунодефициты проявляются на ранних этапах постнатального периода и наследуются по аутосомно-рецессивному типу. Первичные иммунодефициты могут проявляться недостаточностью фагоцитоза, системы комплемента, гуморального и клеточного иммунитета, комбинированной иммунной недостаточностью.

*Недостаточность фагоцитоза* обусловлена уменьшением числа фагоцитов или их функциональной неполноценностью. Периодическая нейтропения лежит в основе циклических нарушений гемопоэза. Этот процесс проявляется в уменьшении количества гранулоцитов и изменении количества моноцитов. Несмотря на то что нейтропении не сопутствует недостаточность гуморального или клеточного иммунитета, при ней возникает повышенная опас-

ность инфекционных заболеваний, в особенности тех, которые вызываются высоковирулентными бактериями. Функциональные дефекты фагоцитоза могут быть обусловлены нарушениями любой стадии процесса фагоцитоза.

*Недостаточность комплемента* встречается редко. Чаще наблюдается дефект синтеза компонентов комплемента, обусловленный наследственной недостаточностью ингибитора эстеразы C1, которая клинически проявляется ангионевротическим отеком. Низкая концентрация ингибитора эстеразы C1 допускает непрерывную частичную активацию C1 с последующим потреблением C4 и C2. При ряде заболеваний, особенно тех, которые протекают с образованием иммунных комплексов, активация комплемента приводит к его избыточному потреблению. При этом наиболее сильно уменьшается количество C1, C4, C2 и C3.

*Недостаточность гуморального иммунитета* проявляется дисгаммаглобулинемией и агаммаглобулинемией. Агаммаглобулинемия обусловлена нарушением синтеза иммуноглобулинов или их ускоренным распадом. При ней в крови больных отсутствуют иммуноглобулины и нарушен антитоксический и антибактериальный иммунитет, т.е. те виды иммунитета, где ведущая роль принадлежит антителам. Дисгаммаглобулинемия обусловлена селективным дефицитом одного класса или субкласса иммуноглобулинов или их комбинированным дефицитом, при этом общий уровень сывороточных иммуноглобулинов может оставаться в пределах нормы или даже повышаться за счет компенсаторного усиления синтеза иммуноглобулинов других классов. Чаще всего встречаются селективный дефицит IgG при одновременно высоком уровне IgM, дефицит IgG и IgA при высоком уровне IgM, селективный дефицит IgA. Наблюдаются дефицит отдельных субклассов иммуноглобулинов и дефект легких цепей иммуноглобулинов.

*Недостаточность клеточного иммунитета* обусловлена нарушением функциональной активности Т-клеток. Поскольку Т-лимфоциты участвуют в проявлении функциональной активности В-клеток, чаще встречается комбинированный иммунодефицит (повреждение Т- и В-клеточного звена), чем селективный Т-клеточный иммунодефицит. Описаны и изолированные Т-клеточные иммунодефициты, такие, как алимфоцитоз (синдром Нозелофа), синдром Ди Джорджи (врожденная аплазия тимуса и паращитовидных желез), иммунодефицит при синдроме Дауна, им-

мунодефицит при карликовом росте. У лиц с таким Т-клеточным иммунодефицитом нарушен противовирусный, противогрибковый, противоопухолевый, трансплантационный иммунитет, т.е. те виды иммунитета, где основная роль принадлежит реакциям Т-клеточного звена иммунной системы. Первыми признаками клеточного иммунодефицита являются микоз, рецидивирующие вирусные инфекции, осложнения после вакцинации живыми вакцинами (полиомиелитной, БЦЖ и др.). Лица с недостаточностью клеточного иммунитета умирают в детском, реже в подростковом возрасте от тяжелой рецидивирующей оппортунистической инфекции или злокачественных опухолей.

*Комбинированные иммунодефициты* развиваются при сочетании нарушений Т- и В-звеньев иммунной системы. Это наиболее тяжело протекающие иммунодефициты. Комбинированные формы встречаются чаще, чем селективные, как правило, они связаны с нарушением центральных органов иммунной системы. В зависимости от тяжести дефекта в разной мере выражена предрасположенность к инфекционным заболеваниям. При значительных расстройствах иммунитета наблюдают частые бактериальные и вирусные инфекции, микотические поражения, что в раннем возрасте приводит к смерти. Иммунный дефект на уровне стволовой клетки обусловлен рядом нарушений: дефектом стволовых клеток, блоком Т- и В-клеточной дифференцировки, первичным Т-клеточным иммунодефицитом, при котором снижение иммунорегуляторной функции приводит к развитию В-клеточного иммунодефицита. Дефект может быть обусловлен эндогенными и экзогенными факторами. Функциональные нарушения могут проявляться даже в том случае, если морфологически клетки больных не отличаются от нормальных. При комбинированных иммунодефицитах ведущая роль принадлежит дефекту Т-клеток.

### *12.4.1.2. Вторичные иммунодефициты*

Вторичные иммунодефициты, в отличие от первичных, развиваются у лиц с нормально функционировавшей от рождения иммунной системой. Они формируются под воздействием окружающей среды на уровне фенотипа и обусловлены нарушением функции иммунной системы в результате различных заболеваний или неблагоприятных воздействий на организм. При вторичных иммунодефицитах могут поражаться Т- и В-система иммунитета, факторы неспецифической резистентности, возможны их сочета-

ния. Вторичные иммунодефициты встречаются значительно чаще, чем первичные. Вторичные иммунодефициты преходящи и поддаются иммунокоррекции, т.е. восстановлению нормальной деятельности иммунной системы.

Вторичные иммунодефициты развиваются после перенесенных инфекций (особенно вирусных) и инвазий (протозойные и гельминтозы); при ожоговой болезни, уремии, опухолях, нарушении обмена веществ и истощении, дисбиозах, тяжелых травмах и обширных хирургических операциях, особенно под общим наркозом, облучении, действии химических веществ; старении, приеме некоторых лекарств.

Иммунодефициты как первичные, так и особенно вторичные широко распространены среди людей. Они являются причиной проявления многих болезней и патологических состояний. Поэтому требуют профилактики и лечения с помощью иммунотропных препаратов.

### 12.4.2. Аутоиммунные болезни

Аутоиммунные болезни — болезни, ведущая роль в патогенезе которых принадлежит аутосенсибилизации.

Различают аутоиммунные реакции и аутоиммунные заболевания, в основе которых лежит взаимодействие компонентов иммунной системы с собственными здоровыми клетками и тканями. К аутоиммунным заболеваниям иногда относят болезни иммунных комплексов.

Аутоиммунные реакции наблюдаются в норме у здоровых лиц, а также при патологии. В первом случае они протекают непрерывно и их действие сводится к удалению отмирающих, стареющих, больных, модифицированных какими-либо воздействиями клеток. Они являются начальным компонентом развертывания иммунного ответа на различные антигены. Эти реакции полезны для организма и не перерастают в болезнь.

Аутоиммунные болезни встречаются реже. В основе этих патологических состояний лежат аутоиммунные реакции с забарьерными перекрестно реагирующими антигенами, образование «запретных» клонов иммунокомпетентных клеток, реагирующих с собственными нормальными тканями, генетически запрограммированная слабость иммунного ответа на конкретный антиген, недостаточность

супрессии, блокада рецепторов лимфоцитов и другие причины. Они могут быть следствием приема лекарственных препаратов.

*Различают органоспецифические, неорганоспецифические и* смешанные аутоиммунные заболевания. При органоспецифических болезнях аутоантитела специфичны для антигенов клеток и тканей одного органа. Обычно это забарьерные антигены, врожденная толерантность к которым отсутствует. При органонеспецифических болезнях аутоантитела реагируют со структурным элементом клеток и тканей данного или даже другого организма, имеющего перекрестные антигенные структуры. Смешанные болезни включают оба механизма.

Часто можно обнаружить нормальные аутоантитела, не вызывающие видимых симптомов заболевания. Они встречаются у совершенно здоровых людей, например ревматоидный, антинуклеарные факторы. Бывает трудно доказать, что клиническая картина заболевания представляет собой следствие аутоиммунного процесса. Обнаружение антител к аутоантигенам еще не позволяет сделать вывод о причинно-следственной связи заболевания с аутоиммунными реакциями. Для подтверждения этого необходимо выявить иммунный ответ на аутоантиген, имеющий отношение к заболеванию, идентифицировать его, пассивно перенести заболевание и спровоцировать болезнь соответствующим антигеном в эксперименте на животных. Аутоиммунные заболевания человека представлены в табл. 12.2.

**Таблица 12.2.** Аутоиммунные заболевания

| Болезни с установленной иммунопатологической природой | Болезни с предполагаемой иммунопатологической природой |
|---|---|
| Гемолитическая анемия, обусловленная тепловыми аутоантителами | Первичный билиарный цирроз печени |
| Гемолитическая анемия с холодовыми гемагглютининами | Пузырчатка обыкновенная и пемфигоид |
| Иммунологически обусловленное бесплодие | Идиопатическая болезнь Аддисона |
| Тиреоидит Хашимото | Идеотипический гипопаратиреоз |
| Иммунотромбоцитопения | Поствакцинальный энцефалит |
| Холодовая гемоглобинурия | Узелковый периартериит |
| Симпатическая офтальмия | Дерматомиозит или полимиозит |

*Окончание табл. 12.2*

| Болезни с установленной иммунопатологической природой | Болезни с предполагаемой иммунопатологической природой |
|---|---|
| Пернициозная анемия | Склеродермия |
| Аутоиммунные нарушения свертываемости крови | Неспецифический язвенный колит |
| Хронический активный гепатит | Гипертиреоз |
| Системная красная волчанка | |
| Ревматоидный артрит | |
| Хронический гломерулонефрит | |

Известно много болезней, в патогенезе которых лежат аутоиммунные процессы, обусловленные рядом причин, в том числе агрессивностью иммунной системы, направленной на образование аутоантител к антигенам собственных клеток и тканей. Эти болезни трудно поддаются лечению. Важное место среди лечебных средств занимают иммунотропные препараты, направленные на снижение агрессивности иммунной системы.

### 12.4.3. Аллергические болезни

Организм на первичный контакт с антигеном отвечает образованием антител и сенсибилизированных лимфоцитов. При вторичном контакте антиген вступает в реакцию с антителами и сенсибилизированными лимфоцитами. Эти реакции направлены на устранение антигена, но при определенных условиях могут привести к патологическим последствиям. Заболевание возникает лишь при значительном отклонении иммунореактивности от нормы. При повышенном уровне индивидуальной реактивности на данные антигены развивается аллергия.

С клинической точки зрения важно разделение аллергических реакций на 4 типа. Различные типы аллергических реакций редко встречаются в чистом виде; как правило, они переходят одна в другую или сочетаются в ходе заболевания.

#### *12.4.3.1. Реакции I типа (анафилактические)*

Анафилаксия представляет собой иммунную реакцию, для которой необходимы специфические цитофильные антитела и клетки-мишени. Она проявляется в виде местной (на коже и слизистых

оболочках) или системной (анафилактический шок) реакции. Местные анафилактические реакции в зависимости от локализации проявляются сыпью, вазомоторным насморком, бронхиальной астмой, кишечными расстройствами. Анафилактическая реакция может протекать в любом органе, поскольку тучные клетки и базофилы встречаются в организме повсеместно, поэтому для каждого вида животных характерны определенные органы, поражаемые чаще других (шок-органы). У человека чаще поражаются артериолы и бронхи. К анафилактическим реакциям человека, которые вызываются IgE, относятся приступы бронхиальной астмы, сенная лихорадка, крапивница, реакции на укусы ос и пчел.

**Вещества, вызывающие анафилаксию**

- Ксеногенные сыворотки:
  - антилимфоцитарная сыворотка;
  - противостолбнячная сыворотка;
  - противодифтерийная сыворотка;
  - другие белковые препараты.
- Пыльца растений:
  - амброзия.
- Природные яды:
  - пчелиный яд;
  - яд ос;
  - змеиный яд.
- Лекарственные препараты:
  - антибиотики (пенициллин);
  - салицилаты;
  - белковые гормоны;
  - вакцины (коревая, гриппозная и др.).

### *12.4.3.2. Реакции II типа (цитотоксические)*

Аллергические реакции II типа опосредованы антителами к поверхностным антигенам клетки или к вторично связанным с клеточной поверхностью антигенам. Ведущая роль принадлежит антителам, способным активировать систему комплемента (IgM, IgG1−3). Кроме комплементзависимой цитотоксичности, сюда можно также отнести антителозависимую клеточно-опосредованную цитотоксичность, не нуждающуюся в комплементе.

Антитела, принимающие участие в цитотоксических реакциях, специфичны для поверхностных АГ клеточной мембраны или вторично связанных с ней АГ. Это наблюдается при некоторых фор-

мах лекарственной аллергии, когда молекулы лекарственного препарата адсорбируются на поверхности клеток крови. Следствием этого могут быть гемолитическая анемия, лейкоцитопения, тромбоцитопения, агранулоцитоз. Наибольшее значение для клинической картины имеют те гуморальные цитотоксические реакции, которые затрагивают эритроциты. Реакция, направленная против эритроцитов другого индивида, называется изоиммунной, а реакция против собственных эритроцитов — аутоиммунной. У каждого человека в сыворотке имеется высокий титр антител к тем антигенам системы АВ0, которые отсутствуют на собственных эритроцитах. При переливании несовместимой крови эти изогемагглютинины вызывают цитотоксическую иммунную реакцию, которая сопровождается гемолизом крови. При повторных беременностях резус-положительным плодом у резус-отрицательных женщин в крови образуются антирезус-IgG, способные проходить через плаценту и, оказывая цитотоксическое действие на эритроциты плода, разрушать их. Это ведет к развитию гемолитической болезни новорожденных. При аутоиммунных гемолитических анемиях образуются аутоантитела к антигенам собственных эритроцитов, которые их разрушают при участии комплемента. Некоторые низкомолекулярные вещества, например определенные лекарственные препараты, обладая аффинностью к мембране эритроцитов, способны стать иммуногенными и вызвать образование антител с развитием гемолитической анемии. Так действует хинин, фенацетин, салицилаты, стрептомицин, пенициллин, цефалоспорины, сульфаниламиды и др. Объектом цитотоксического действия могут стать и другие форменные элементы крови (агранулоцитоз, тромбоцитопения).

*12.4.3.3. Реакции III типа (иммунокомплексные)*

Аллергические реакции III типа опосредованы иммунными комплексами, которые образуются при преципитации в небольшом избытке антигена. В зависимости от количества и иммуногенности антигена иногда происходит отложение образовавшихся иммунных комплексов в тканях. Биологические свойства таких комплексов обусловлены соотношением антигена и антител. Иммунные агрегаты, образовавшиеся при значительном избытке антигена, имеют малые и средние размеры и могут обладать токсическим свойством. В образовании токсичных иммунных комплексов участвуют IgM, IgG1−3, связывающие комплемент. Благодаря ак-

тивации комплемента в местах отложения иммунных комплексов происходит высвобождение биологически активных медиаторов-анафилотоксинов (С3а, С3b, С5а), которые, повышая проницаемость сосудов и привлекая полиморфно-ядерные лейкоциты, способствуют развитию воспаления. Фагоцитированные токсичные иммунные комплексы повреждают и разрушают гранулоциты, из которых выделяются протеолитические ферменты, разрушающие ткани организма. Симптомы, вызываемые токсичными иммунными комплексами, обусловлены повреждающим действием токсических факторов эндогенной природы, высвобождающихся при воспалении в результате активации комплемента и распада нейтрофилов.

Иммунные комплексы образуются в кровотоке, когда антиген и антитела одновременно находятся в плазме крови либо в тканях, когда антиген введен в ткань, а антитела находятся в крови и происходит их встречная взаимная диффузия. В первом случае развивается обусловленный иммунными комплексами васкулит, во втором — феномен Артюса. При аллергическом васкулите образование иммунных комплексов происходит при небольшом избытке антигена непосредственно в просвете сосуда. Местом их нахождения может стать любой кровеносный сосуд, и тогда в результате активации комплемента и лейкотаксиса происходят повреждение ткани и даже запустение сосуда. Чаще поражаются сосуды нижних конечностей и капилляры почечных клубочков. Типичный пример аллергического васкулита — гломерулонефрит. Решающее значение при данном виде патологии имеют сам факт персистенции антигена и его концентрация. Некоторые микробы (стрептококки группы А) и продукты их распада способствуют развитию хронического гломерулонефрита. Особый случай васкулита, обусловленного иммунными комплексами, — сывороточная болезнь, которая развивается через 8—10 дней после однократного введения гетерологичной сыворотки и сопровождается повышением температуры, увеличением селезенки и лимфатических узлов, лейкоцитозом и снижением активности комплемента. Симптомы сывороточной болезни возникают с появлением в кровотоке антител и сохраняются до тех пор, пока в кровотоке находится свободный антиген. Симптомы исчезают после иммунной элиминации антигена. При феномене Артюса иммунная реакция первично направлена только на чужеродный антиген, но высвобождение лизосомальных

ферментов в местах отложения иммунных комплексов приводит к вторичному повреждению тканей. Классическая реакция Артюса у человека наблюдается при воздействии некоторых ингаляционных аллергенов, особенно при регулярных повторных воздействиях. К подобным заболеваниям относится аллергический альвеолит, при котором в сыворотке больных часто обнаруживаются преципитирующие антитела к промышленным аллергенам («легкие фермера», «легкие птичника»).

*12.4.3.4. Реакции IV типа (опосредованные Т-лимфоцитами)*

Некоторые антигены преимущественно стимулируют Т-лимфоциты и вызывают благодаря этому формирование клеточного иммунитета. К ним относятся антигены внутриклеточных паразитов, трансплантатов, природные и синтетические гаптены (лекарственные препараты, пищевые красители и др.). ГЗТ может вызываться практически всеми известными антигенами, наиболее ярко она проявляется на низкоиммуногенные антигены (полисахариды, низкомолекулярные пептиды). Реакцию вызывают малые дозы аллергенов, особенно при внутрикожном введении, что сопровождается сенсибилизацией Т-хелперов. Сенсибилизированные лимфоциты выделяют медиаторы, в том числе интерлейкин-2, которые активируют макрофаги и вовлекают их в процесс разрушения антигена, вызвавшего сенсибилизацию. Цитотоксичность проявляют и сами Т-лимфоциты. О роли лимфоцитов в возникновении ГЗТ свидетельствует возможность адаптивной передачи аллергии от сенсибилизированного организма несенсибилизированному с помощью введения лимфоцитов, а также подавления этой реакции антилимфоцитарной сывороткой.

Морфологическая картина при ГЗТ носит воспалительный характер, обусловленный реакцией лимфоцитов и макрофагов на образующийся комплекс антигена с сенсибилизированными лимфоцитами и проявляется через 24–48 ч. Ее типичным примером служит туберкулиновая реакция. Внутрикожное введение туберкулина сенсибилизированному индивиду вызывает покраснение и отек на месте инъекции, достигающие максимума через 24–48 ч с момента введения аллергена. Образуется плотная гиперемированная папула с некрозом в центре. Некротизированная ткань иногда отторгается, оставляя после себя изъязвление, которое медленно

заживает. Гистологически обнаруживают скопление макрофагов и лимфоцитов.

ГЗТ может вызвать введение лекарственных препаратов или контакт с некоторыми низкомолекулярными веществами. Низкомолекулярные соединения являются гаптенами, присоединившись к носителям, которыми являются собственные белки организма, они индуцируют развитие ГЗТ. Типичный пример опосредованной клетками гиперчувствительности кожи представляет контактная экзема. При встрече сенсибилизированного индивида с гаптеном происходит локальная активация Т-лимфоцитов и макрофагов. Высвобождающиеся при этом лимфокины запускают патологический процесс, который клинически проявляется экземой. Наиболее часто контактную аллергию вызывают синтетические моющие средства, соединения хрома, никеля, ртути, парафенилендиамин, ДНХБ, многие консерванты и медикаменты.

## 12.5. Иммунокоррекция

Иммунокоррекция — раздел клинической иммунологии, изучающий способы и методы профилактики и лечения болезней или состояний (иммунодефицитов), связанных с нарушением функции иммунной системы.

Препараты, влияющие на иммунный статус и применяемые для иммунокоррекции, называют *иммуномодуляторами*. К настоящему времени известны сотни иммуномодуляторов, применяемых в медицине (подробнее см. главу 14).

Цель оптимальной иммунокоррекции — направленное воздействие на способность организма к иммунному ответу, т.е. на активацию или подавление активности иммунной системы в зависимости от показаний. Например, для создания иммунитета к возбудителям инфекционных болезней иммунную систему активируют с помощью вакцин, а пассивный иммунитет создают введением сывороток или иммуноглобулинов. При аллергических состояниях и некоторых иммунопатологических процессах необходимо подавить иммунную систему, поэтому применяют иммунодепрессанты. Они же используются при трансплантации органов и тканей. Особое значение приобретает антигенспецифическая стимуляция или супрессия. Поскольку существуют определенные

ограничения по клиническому применению, основным подходом к лечению остается неспецифическая коррекция.

*Общим принципом иммунокоррекции является ее проведение* на фоне полноценного питания, приема витаминов, микро- и макроэлементов. Принципы иммунокоррекции:

- *иммунотерапию применять только после определения состояния* иммунной системы, т.е. иммунного статуса и выявления недостаточного функционирования звена иммунитета;
- *иммунотерапию обязательно назначать при нарушениях иммунного статуса*, сопровождающихся клиническими симптомами;
- *в процессе иммунотерапии необходимо следить за состоянием* иммунного статуса в динамике;
- использовать иммуномодуляторы для профилактики тех воздействий, *которые могут вызвать иммунодефициты* (экологические, социальные и другие факторы).

## Задания для самоподготовки (самоконтроля)

А. Укажите формы иммунитета, в которых принимает участие комплемент:

1. Иммунитет слизистых оболочек.
2. Антитоксический.
3. Антибактериальный гуморальный.
4. Гуморальный противовирусный.

Б. Укажите формы иммунитета, в которых принимают участие Т-киллеры:

1. Трансплантационный.
2. Противоопухолевый.
3. Противовирусный.
4. Антибактериальный.

В. Укажите формы инфекций, сопровождающихся развитием ГЗТ:

1. Глистная инвазия.
2. Грибковая.
3. Вирусная.
4. Паразитарная.
5. Бактериальная.

Г. Отметьте компоненты противоглистного иммунитета:

1. IgE.
2. Т-киллер.
3. Комплемент.
4. Эозинофилы.

Д. Пациент страдает рецидивирующими вирусными инфекциями и микозом, который не поддается лечению. Врач предположил наличие у него иммунодефицита. Назовите пораженное звено иммунного ответа.

# Глава 13

# ИММУНОДИАГНОСТИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

## 13.1. Реакции антиген–антитело и их применение

При введении антигена в организме образуются антитела. Антитела комплементарны антигену, вызвавшему их синтез, и способны с ним связываться. Связывание антигенов с антителами состоит *из двух фаз. Первая фаза — специфическая, при которой происходит быстрое связывание антигенной детерминанты с активным центром *Fab*-фрагмента антител. Следует отметить, что связывание обусловлено ван-дер-ваальсовыми силами, водородными и гидрофобными взаимодействиями. Прочность связи определяется степенью пространственного соответствия активного центра антитела и эпитопа антигена. После специфической фазы наступает *более медленная — неспецифическая, которая проявляется видимым физическим явлением (например, образованием хлопьев при агглютинации и др.).

Иммунные реакции — это взаимодействие между антителами и антигенами, причем эти реакции специфичны и обладают высокой чувствительностью. Они широко используются в медицинской практике. С помощью иммунных реакций можно решить следующие задачи:

- определение неизвестных антител по известным антигенам (антигенный диагностикум). Такая задача стоит, когда необходимо определить в сыворотке крови больного антител к возбудителю (серодиагностика). Нахождение антител позволяет подтвердить диагноз;
- определение неизвестных антигенов по известным антителам (диагностическая сыворотка). Это исследование проводят при идентификации культуры возбудителя, выделенной из материала больного (серотипирование), а также при обнаружении

антигенов микробов и их токсинов в крови и других биологических жидкостях.

Существует много разновидностей иммунных реакций, различающихся по технике постановки и регистрируемому эффекту. Это реакции агглютинации (РА), преципитации (РП), реакции с участием комплемента (РСК), реакции с использованием меченых компонентов (РИФ, ИФА, РИА).

## 13.2. Реакция агглютинации

Реакция агглютинации (РА) — это иммунная реакция взаимодействия антигена с антителами в присутствии электролитов, причем антиген находится в корпускулярном состоянии (эритроциты, бактерии, частицы латекса с адсорбированными антигенами). При агглютинации происходит склеивание корпускулярных антигенов антителами, что проявляется образованием хлопьевидного осадка. Образование хлопьев происходит за счет того, что антитела имеют два активных центра, а антигены поливалентны, т.е. имеют несколько антигенных детерминант. РА применяют для идентификации возбудителя, выделенного из материала больного, а также для обнаружения в сыворотке крови больного антител к возбудителю (например, реакции Райта и Хеддлсона при бруцеллезе, реакция Видаля при брюшном тифе и паратифах).

Самый простой способ постановки РА — реакция на стекле, это ориентировочная РА, которая применяется для определения возбудителя, выделенного от больного. При постановке реакции на предметное стекло наносят диагностическую агглютинирующую сыворотку (в разведении 1:10 или 1:20), затем вносят культуру от больного. Реакция положительная, если в капле появляется хлопьевидный осадок. Рядом ставят контроль: вместо сыворотки наносят каплю раствора натрия хлорида. Если диагностическая агглютинирующая сыворотка неадсорбированная[1], то ее разводят (до титра — разведения, до которого должна происходить агглютинация), т.е. ставят развернутую РА в пробирках с увеличивающимися

[1] Неадсорбированная агглютинирующая сыворотка может агглютинировать родственные бактерии, имеющие общие (перекрестно реагирующие) антигены. Поэтому пользуются ***адсорбированными агглютинирующими сыворотками***, из которых удалены перекрестно реагирующие антитела путем адсорбции их родственными бактериями. В таких сыворотках сохраняются антитела, специфичные только к данной бактерии.

разведениями агглютинирующей сыворотки, к которым добавляют по 2–3 капли взвеси возбудителя, выделенного от больного. Агглютинацию учитывают по количеству осадка и степени просветления жидкости в пробирках. Реакцию считают положительной, если агглютинация отмечается в разведении, близком к титру диагностической сыворотки. Реакция сопровождается контролями: сыворотка, разведенная изотоническим раствором натрия хлорида, должна быть прозрачной, взвесь микробов в том же растворе — равномерно мутной, без осадка.

Для определения в сыворотке крови больного антител к возбудителю используют развернутую РА. При ее постановке в пробирках разводят сыворотку крови больного и добавляют в пробирки равное количество взвеси диагностикума (взвесь убитых микробов). После инкубации определяют наибольшее разведение сыворотки, при котором произошла агглютинация, т.е. образовался осадок (титр сыворотки). При этом реакция агглютинации с О-диагностикумом (бактерии, убитые нагреванием, сохранившие термостабильный О-антиген) происходит в виде мелкозернистой агглютинации. Реакция агглютинации с Н-диагностикумом (бактерии, убитые формалином, сохранившие термолабильный жгутиковый Н-антиген) — крупнохлопчатая и протекает быстрее.

*Реакция непрямой (пассивной) гемагглютинации* (РНГА или РПГА) является разновидностью РА. Этот метод обладает высокой чувствительностью. С помощью РНГА можно решить две задачи: определить антитела в сыворотке крови больного, к которой добавляют антигенный эритроцитарный диагностикум, представляющий собой эритроциты, на которых адсорбированы известные антигены; определить наличие антигенов в исследуемом материале. В этом случае реакцию иногда называют реакцией обратной непрямой гемагглютинацией (РОНГА). При постановке к исследуемому материалу добавляют антительный эритроцитарный диагностикум (эритроциты с адсорбированными на их поверхности антителами). Эритроциты в этой реакции выполняют роль носителей и пассивно вовлекаются в образование иммунных агрегатов. При положительной реакции пассивно склеенные эритроциты покрывают дно лунки ровным слоем с фестончатыми краями («зонтик»); при отсутствии агглютинации эритроциты скапливаются в центральном углублении лунки, образуя компактную «пуговку» с резко очерченными краями.

*Реакция коагглютинации* используется для определения клеток возбудителя (антигенов) с помощью антител, адсорбированных на *Staphylococcus aureus*, содержащем белок А. Белок А обладает сродством к Fc-фрагменту иммуноглобулинов. Благодаря этому антитела связываются с стафилококком опосредованно через Fc-фрагмент, а *Fab*-фрагменты ориентированы наружу и способны взаимодействовать с соответствующими микробами, выделенными от больных. При этом образуются хлопья.

*Реакция торможения гемагглютинации (РТГА)* используется при диагностике вирусных инфекций, причем только инфекций, вызываемых гемагглютинирующими вирусами. Эти вирусы содержат на своей поверхности белок — гемагглютинин, который ответствен за реакцией гемагглютинации (РГА) при добавлении к вирусам эритроцитов. РТГА заключается в блокировании антителами вирусных антигенов, в результате чего вирусы теряют способность агглютинировать эритроциты.

*Реакция Кумбса* — РА для определения неполных антител. При некоторых инфекционных заболеваниях, например при бруцеллезе, в сыворотке крови больного циркулируют неполные антитела к возбудителю. Неполные антитела называют блокирующими, так как они имеют один антигенсвязывающий участок, а не два, как полноценные антитела. Поэтому при добавлении антигенного диагностикума неполные антитела связываются с антигенами, но не склеивают их. Для проявления реакции добавляют антиглобулиновую сыворотку (антитела к иммуноглобулинам человека), которая приведет к агглютинации иммунных комплексов (антигенный диагностикум + неполные антитела), образовавшихся в первой стадии реакции.

Непрямую реакцию Кумбса применяют у больных при внутрисосудистом гемолизе. У некоторых таких больных обнаруживают неполные одновалентные антирезусные антитела. Они специфически взаимодействуют с резусположительными эритроцитами, но не вызывают их агглютинации. Поэтому в систему антирезусные антитела + резус-положительные эритроциты добавляют антиглобулиновую сыворотку, что вызывает агглютинацию эритроцитов. С помощью реакции Кумбса диагностируют патологические состояния, связанные с внутрисосудистым лизисом эритроцитов иммунного генеза, например гемолитическую болезнь новорожденных, обусловленную резус-конфликтом.

*РА для определения групп крови* основана на агглютинации эритроцитов антителами иммунной сыворотки к антигенам групп крови A(II), B(III). Контролем являются сыворотка, не содержащая антител, т.е. сыворотка AB(IV) группы крови, и антигены эритроцитов групп A(II) и B(III). В качестве отрицательного контроля применяют эритроциты группы 0(I), поскольку они не имеют антигенов.

Для определения резус-фактора используют антирезусные сыворотки (не менее двух различных серий). При наличии на мембране исследуемых эритроцитов резус-антигена происходит агглютинация этих клеток.

## 13.3. Реакция преципитации

РП — это иммунная реакция взаимодействия антител с антигенами в присутствии электролитов, причем антиген находится в растворимом состоянии. При преципитации происходит осаждение растворимых антигенов антителами, что проявляется помутнением в виде полос преципитации. Образование видимого преципитата наблюдается при смешивании обоих реагентов в эквивалентных соотношениях. Избыток одного из них снижает количество осаждающихся иммунных комплексов. Существуют различные способы постановки реакции преципитации.

*Реакция кольцепреципитации* ставится в преципитационных пробирках с малым диаметром. В пробирку вносят иммунную сыворотку и осторожно наслаивают растворимый антиген. При положительном результате на границе двух растворов образуется кольцо молочного цвета. Реакция кольцепреципитации, с помощью которой определяют наличие антигенов в органах и тканях, экстракты которых кипятят и фильтруют, называется реакцией термопреципитации (реакция Асколи для определения термостабильного сибиреязвенного антигена).

*Реакция двойной иммунодиффузии по Оухтерлони.* Эта реакция проводится в агаровом геле. В слое геля равномерной толщины на определенном расстоянии друг от друга вырезают лунки и заполняют их антигеном и иммунной сывороткой соответственно. После этого антигены и антитела диффундируют в гель, встречаются друг с другом и образуют иммунные комплексы, которые преципитируют в геле и становятся видимыми как линии преци-

питации. Эту реакцию можно использовать для определения неизвестных антигенов или антител, а также для проверки сходства между различными антигенами: если антигены идентичны, линии преципитации сливаются, если антигены неидентичны, линии преципитации пересекаются, если антигены частично идентичны, формируется шпора.

*Реакция радиальной иммунодиффузии.* В расплавленный агаровый гель добавляют антитела и наносят гель равномерным слоем на стекло. В геле вырезают лунки и вносят в них стандартный объем различных по концентрации растворов антигена. Во время инкубации антигены радиально диффундируют из лунки и, встретившись с антителами, образуют кольцо преципитации. До тех пор пока в лунке сохраняется избыток антигена, происходит постепенное увеличение диаметра кольца преципитации. Этот метод используется для определения антигенов или антител в исследуемом растворе (например для определения концентрации иммуноглобулинов разных классов в сыворотке крови).

*Иммуноэлектрофорез.* Предварительно электрофоретически разделяют смесь антигенов, затем в канавку, идущую вдоль направления движения белков, вносят преципитирующую антисыворотку. Антигены и антитела диффундируют в гель навстречу друг другу; взаимодействуя, они образуют дугообразные линии преципитации.

*Реакция флоккуляции* (по Рамону) — разновидность реакции преципитации, которая используется для определения активности антитоксической сыворотки или анатоксина. Реакцию проводят в пробирках. В пробирке, где анатоксин и антитоксин находятся в эквивалентном соотношении, наблюдается помутнение.

## 13.4. Реакция связывания комплемента

Антитела, взаимодействуя с соответствующим антигеном, связывают добавленный комплемент (1-я система). Индикатором связывания комплемента служат эритроциты, сенсибилизированные гемолитической сывороткой, т.е. антителами к эритроцитам (2-я система). Если комплемент не фиксируется в 1-й системе, т.е. не происходит реакция антиген—антитело, то сенсибилизированные эритроциты полностью лизируются (отрицательная реакция). При связывании комплемента иммунными комплексами 1-й системы после добавления сенсибилизированных эритроцитов гемолиз от-

сутствует (положительная реакция). Реакция связывания комплемента используется для диагностики инфекционных болезней (гонореи, сифилиса, гриппа и др.).

## 13.5. Реакция нейтрализации

Микробы и их токсины оказывают повреждающее действие на органы и ткани организма человека. Антитела способны связываться с этими повреждающими агентами и блокировать их, т.е. нейтрализовать. На этой особенности антител основана диагностическая реакция нейтрализации. Ее проводят путем введения смеси антиген–антитело животным или в чувствительные тест-объекты (культуру клеток, эмбрионы). Например для обнаружения токсинов в материале больного животным 1-й группы вводят материал больного. Животным 2-й группы вводят аналогичный материал, предварительно обработанный соответствующей антисывороткой. Животные 1-й группы при наличии токсина в материале погибают. Вторая группа животных выживает, повреждающее действие токсина не проявляется, так как происходит его нейтрализация.

## 13.6. Реакции с использованием меченых антител или антигенов

### 13.6.1. Реакция иммунофлюоресценции (РИФ, метод Кунса)

Этот метод используется для экспресс-диагностики. С его помощью можно выявлять как микробные антигены, так и антитела.

*Прямой метод РИФ* — иммунная реакция взаимодействия антител с антигенами, причем антитела метят флюорохромом — веществом, способным при попадании света определенной длины волны испускать кванты света также определенной длины волны. Особенность постановки этого метода заключается в необходимости удаления непрореагировавших компонентов, чтобы исключить выявление неспецифического свечения. Для этого проводят отмывание от непрореагировавших антител. Результаты оценивают с помощью люминесцентного микроскопа. Бактерии в мазке, обработанные такой люминесцирующей сывороткой, светятся на темном фоне по периферии клетки.

*Непрямой метод РИФ* используется чаще предыдущего. Эта реакция проводится в два этапа. На первом этапе антигены взаи-

модействуют с соответствующими антителами, образуя иммунные комплексы. Все компоненты, которые не прореагировали (т.е. не в составе иммунных комплексов), должны быть удалены отмыванием. На втором этапе образовавшийся комплекс антиген–антитело выявляется с помощью флюорохромированной антиглобулиновой сыворотки. В результате образуется комплекс микроб + антимикробные кроличьи антитела + антитела к иммуноглобулинам кролика, меченные флюорохромом. Результаты оценивают с помощью люминесцентного микроскопа.

### 13.6.2. Иммуноферментный метод или анализ

ИФА — наиболее распространенный современный метод, используемый для диагностики вирусных, бактериальных, протозойных инфекций, в частности для диагностики ВИЧ-инфекции, вирусных гепатитов и др.

Модификаций ИФА очень много. Широко используется твердофазный неконкурентный вариант ИФА. Его проводят в 96-луночных полистироловых планшетах (твердая фаза). При проведении реакции необходимо на каждом этапе отмывать непрореагировавшие компоненты. При определении антител в лунки, на которых сорбированы антигены, вносят исследуемую сыворотку крови, затем антиглобулиновую сыворотку, меченную ферментом. Проявляют реакцию, добавляя субстрат для фермента. В присутствии фермента субстрат изменяется, причем ферментсубстратный комплекс подбирают таким образом, чтобы образующийся в реакции продукт был цветным. Таким образом, при положительной реакции наблюдается изменение цвета раствора. Для определения антигенов твердофазный носитель сенсибилизируется антителами, затем последовательно вносятся исследуемый материал (антигены) и сыворотка к антигенам, меченная ферментом. Для проявления реакции вносят субстрат для фермента. Изменение цвета раствора происходит при положительной реакции.

### 13.6.3. Иммуноблоттинг

Этот метод основан на сочетании электрофореза и ИФА. При проведении иммуноблоттинга (блоттинг от англ. *blot* — пятно) сложную смесь антигенов вначале подвергают электрофорезу в полиакриламидном геле. Полученные фракционированные анти-

генные пептиды переносят на нитроцеллюлозную мембрану. Затем блоты обрабатывают антителами к специфическому антигену, меченными ферментом, т.е. проводят ИФА блота. Иммуноблоттинг используют в диагностике инфекций, например ВИЧ.

### 13.6.4. Иммунная электронная микроскопия

Метод заключается в микроскопировании в электронном микроскопе вирусов (реже других микробов), предварительно обработанных соответствующей иммунной сывороткой, меченной электронноолтически-плотными препаратами, например ферритином — железосодержащим белком.

## 13.7. Проточная цитометрия

Клетки крови дифференцируют на основе лазерной цитофлюорометрии. Для этого искомые клетки окрашивают флюоресцирующими моноклональными антителами к CD-антигенам. Образец крови после обработки мечеными антителами пропускают через тонкую трубку и через него пропускают лазерный луч, который возбуждает свечение флюорохрома. Интенсивность флюоресценции коррелирует с плотностью антигенов на поверхности клеток и может быть количественно измерена с помощью фотоумножителя. Полученные результаты преобразуются в гистограмму.

Проточную цитометрию применяют для определения иммунного статуса (содержание основных популяций лимфоцитов, содержание внутриклеточных и внеклеточных цитокинов, функциональная активность NK-клеток, активность фагоцитоза и др.).

# Глава 14

# ИММУНОПРОФИЛАКТИКА И ИММУНОТЕРАПИЯ

## 14.1. Сущность и место иммунопрофилактики и иммунотерапии в медицинской практике

Иммунопрофилактика и иммунотерапия являются разделами иммунологии, которые изучают и разрабатывают способы и методы специфической профилактики и лечения инфекционных и неинфекционных болезней с помощью иммунобиологических препаратов, действующих на основе иммунологических принципов и/или влияющих на иммунную систему.

Иммунопрофилактика направлена на создание иммунитета к возбудителю инфекционного заболевания или его антигенам, а также патогену для предупреждения возможного заболевания путем формирования невосприимчивости к ним организма. Иммунотерапия направлена на лечение уже развившегося заболевания, в основе которого лежат нарушения функций иммунной системы, или же иммунной системе принадлежит ведущая роль в восстановлении здоровья.

Иммунопрофилактика и иммунотерапия применяются, когда необходимо:

- сформировать специфический иммунитет или активизировать деятельность иммунной системы;
- подавить активность отдельных звеньев иммунной системы;
- нормализовать работу иммунной системы, если имеются отклонения ее функций в ту или иную сторону.

Иммунопрофилактика и иммунотерапия широко применяются для профилактики и лечения инфекционных и онкологических болезней, аллергий, иммунопатологических состояний, иммунодефицитов и других заболеваний, а также при трансплантологии.

Часто иммунопрофилактика и иммунотерапия являются единственными способами борьбы с инфекционными болезнями.

Только благодаря вакцинопрофилактике на земном шаре удалось ликвидировать натуральную оспу, полиомиелит на большинстве континентов, резко снизить заболеваемость корью, эпидемическим паротитом, краснухой. В лечении целого ряда токсинемических инфекций (ботулизм, столбняк и др.) ведущее значение имеет серотерапия, т.е. применение антитоксических сывороток и иммуноглобулинов.

Принцип иммунопрофилактики и иммунотерапии сводится к тому или иному воздействию на иммунную систему, т.е. к активации, супрессии или нормализации ее работы. Это воздействие может быть активным или пассивным, специфическим или неспецифическим. Для такого избирательного и дифференцированного действия на иммунную систему разработано множество препаратов, объединенных в группу *иммунобиологических препаратов* (ИБП).

## 14.2. Иммунобиологические препараты

### 14.2.1. Общая характеристика и классификация ИБП

Действующим началом ИБП являются антигены, полученные тем или иным способом, антитела или микробные клетки, биологически активные вещества типа цитокинов, иммунокомпетентные клетки, другие иммунореагенты. Кроме действующего начала, ИБП могут включать стабилизаторы, адъюванты, консерванты и другие субстанции, улучшающие качество препаратов.

В настоящее время выделяют 5 основных групп ИБП (А.А. Воробьев).

Первая группа — ИБП, получаемые из живых или убитых микробов (бактерии, вирусы, грибы) или микробных продуктов и используемые для специфической профилактики и лечения. К этой группе относятся живые и инактивированные вакцины, субъединичные вакцины, анатоксины, бактериофаги, пробиотики.

Вторая группа — ИБП на основе антител. К этой группе относятся иммуноглобулины, иммунные сыворотки, иммунотоксины, антитела-ферменты, рецепторные антитела, мини-антитела.

Третья группа — иммуномодуляторы для иммунокоррекции, лечения и профилактики инфекционных, неинфекционных болезней, иммунодефицитов. К этой группе относятся экзогенные и эндогенные иммуномодуляторы.

Четвертая группа — адаптогены — сложные химические вещества растительного происхождения, обладающие широким спектром биологической активности, действующие на иммунную систему.

Пятая группа — диагностические препараты и системы для специфической диагностики инфекционных и неинфекционных заболеваний, с помощью которых можно идентифицировать антигены, антитела, ферменты, продукты метаболизма, биологически активные вещества, чужеродные клетки.

### 14.2.2. Вакцины

Термин «вакцина» (от франц. *vacca* — корова) ввел Л. Пастер в честь создателя первой вакцины Дженнера, применившего вирус коровьей оспы для иммунизации людей против натуральной оспы человека.

Вакцины используют в первую очередь для активной специфической профилактики инфекционных заболеваний. Однако в последнее время область применения вакцин значительно расширилась. Созданы вакцины для профилактики и лечения неинфекционных и онкологических болезней, наркозависимости, табакокурения и др. Действующим началом всех вакцин является специфический антиген.

Вакцина представляет собой сложный ИБП, в состав которого, кроме специфических антигенов, входят стабилизаторы, консерванты, адъюванты. В качестве стабилизаторов, предохраняющих антиген от разрушения, чаще всего используют гомологичные белки (человеческий альбумин, сахарозо-агар-желатин и др.). В качестве консервантов для подавления роста случайно попавших в препарат микроорганизмов применяют мертиолат, формалин и другие антимикробные препараты. Иногда для повышения иммуногенности антигена в вакцинные препараты добавляют адъюванты различной природы.

Вакцины применяют парентерально, внутримышечно, подкожно, чрескожно или интраназально, перорально согласно календарю прививок или по определенным для каждой вакцины показаниям.

#### *14.2.2.1. Живые вакцины*

Живые вакцины представляют собой препараты, в которых действующим началом являются ослабленные тем или иным способом,

потерявшие вирулентность, но сохранившие специфическую антигенную активность штаммы патогенных микроорганизмов (бактерий, вирусов). Такие штаммы получили название аттенуированных штаммов. Аттенуация (ослабление) достигается путем длительного воздействия на штамм химических (мутагены), физических (температура, радиация) факторов или же длительного пассирования через организм невосприимчивых к инфекции животных или других биообъектов (эмбрионы птиц, культуры клеток). В результате такой обработки селектируются штаммы со сниженной вирулентностью, но способные при введении в организм человека вызывать специфический иммунный ответ, не вызывая инфекционного заболевания. Примером таких вакцин являются живые вакцины против кори, эпидемического паротита, краснухи, полиомиелита, гриппа. Кроме того, в качестве живых вакцин иногда используют так называемые дивергентные штаммы, т.е. непатогенные для человека микроорганизмы, имеющие общие протективные антигены с возбудителем инфекции. Классическими примерами дивергентных живых вакцин являются вакцина против натуральной оспы, в которой используется живой вирус оспы коров, и БЦЖ-вакцина, в состав которой включены родственные в антигенном отношении микобактерии бычьего типа.

В последнее время успешно развивается новое направление в создании живых вакцин на основе генно-инженерных технологий. Принцип его основан на получении рекомбинантных штаммов бактерий или вирусов, в геном которых включены гены протективных антигенов патогенных микробов. Попадая в организм человека, эти штаммы при размножении синтезируют специфический антиген и, таким образом, создают иммунитет к возбудителю инфекции. Такие вакцины называются векторными. В качестве вектора используются некоторые поксвирусы, непатогенные штаммы сальмонелл и другие микроорганизмы.

#### *14.2.2.2. Инактивированные (убитые) вакцины*

Инактивированные вакцины в качестве действующего начала включают убитые тем или иным способом микроорганизмы (бактерии, вирусы). Для инактивации микроорганизмов обычно используют формальдегид, спирты, фенол, температурное и УФ-воздействие, ионизирующую радиацию и другие физические или химические методы.

Получают инактивированные вакцины путем выращивания микроорганизмов на искусственных питательных средах (бактерии) или культурах клеток. После инактивации тем или иным методом проводят выделение и очистку антигенных комплексов, при необходимости лиофилизацию. В препарат добавляют консервант, иногда адъюванты. Применяются такие вакцины, как правило, в виде нескольких инъекций на курс вакцинации. Примером инактивированных вакцин являются вакцины против гриппа, неживая вакцина против полиомиелита, вакцина против бешенства и некоторые другие вакцины против особо опасных инфекций.

#### *14.2.2.3. Молекулярные вакцины*

В молекулярных вакцинах антиген находится в молекулярной форме или в виде фрагментов его молекулы (эпитопов). Такие антигены можно получить либо биологическим синтезом в процессе культивирования микроорганизмов, либо при культивировании рекомбинантных бактерий или грибов, содержащих ген нужного антигена, либо химическим синтезом антигенных детерминант. К сожалению, рекомбинантные технологии получения молекулярных вакцин не нашли широкого распространения прежде всего из-за низкой иммуногенности антигенов. В медицинской практике широко применяется только одна рекомбинантная вакцина против гепатита В, полученная из антигена вируса, продуцируемого рекомбинантным штаммом дрожжей. При вакцинации этой вакциной препарат необходимо вводить трижды с короткими (месяц) промежутками для получения полноценного иммунного ответа.

#### *14.2.2.4. Анатоксины (токсоиды)*

Принцип получения анатоксинов состоит в том, что образующийся при культивировании бактерий токсин в молекулярном виде превращают в нетоксическую, но сохраняющую иммуногенность форму — анатоксин. Для этого токсин подвергают нагреванию до 37 °С и обработке 0,4% формалином в течении 3–4 нед, после чего обязательно проверяют препарат на токсичность, очищают от клеточных компонентов, продуктов бактерий и питательной среды и концентрируют. Для повышения иммуногенности добавляют адъюванты. Примером таких вакцин служат дифтерийный, столбнячный, ботулинический, стафилококковый, холерный и гангренозный анатоксины.

### 14.2.2.5. Синтетические вакцины

Молекулы антигенов и их эпитопы сами по себе малоиммуногенны. Это связано с их быстрым распадом в организме, а также недостаточно активным процессом адгезии их иммунокомпетентными клетками из-за небольшой молекулярной массы. Для повышения иммуногенности их сшивают с полимерными крупномолекулярными безвредными для организма соединениями, которые играют роль шлеппера и адъюванта. Такой искусственно созданный комплекс долго сохраняется в организме и легко адгезируется иммунокомпетентными клетками. Вакцины, созданные таким образом, получили название молекулярных вакцин. Примером такой вакцины является отечественная вакцина против гриппа Гриппол.

### 14.2.2.6. Ассоциированные вакцины

Ассоциированными называются вакцины, в состав которых входит несколько разнородных антигенов, что позволяет проводить вакцинопрофилактику сразу нескольких инфекций. Разработкой таких вакцин занимаются для того, чтобы уменьшить число вакцин и инъекций при проведении массовой вакцинации. Создание таких вакцин обоснованно, так как показано, что иммунная система способна отвечать сразу на десятки различных антигенов. Основная задача при создании ассоциированных вакцин заключается в том, чтобы сбалансировать состав входящих в нее антигенов и недопустить их взаимную конкуренцию и поствакцинальные осложнения. В состав таких вакцин могут входить как живые, так и убитые вакцины. Если в состав препарата входят однородные компоненты, то такую вакцину называют поливакциной, например живая полиомиелитная вакцина, в состав которой входят аттенуированные штаммы вируса полиомиелита I, II и III типа. Если препарат состоит из разнородных компонентов, его называют комбинированной вакциной. Примерами комбинированных вакцин являются живая ассоциированная вакцина против кори, эпидемического паротита и краснухи и АКДС-вакцина (коклюш, дифтерия, столбняк).

### 14.2.2.7. Адъюванты

Как уже говорилось, иногда для усиления иммуногенности вакцинных препаратов прибегают к помощи адъювантов (от лат. *adjuvant* – помощник). В качестве адъювантов используют минеральные сорбенты (гели гидрата окиси и фосфата алюминия), по-

лимеры, сложные химические соединения (ЛПС, мурамилдипептид и др.), бактериальные клетки и их компоненты (БЦЖ, коклюшные бактерии), липиды и эмульгаторы (ланолин, арлацел), вещества, вызывающие воспаление (сапонин, скипидар). Эти различные по происхождению и химической структуре вещества имеют одно общее свойство — способность усиливать иммуногенность различных антигенов. Механизм действия адъювантов очень сложный. Они действуют не только на антиген, но и на организм. Действие на антиген заключается в укрупнении его молекулы, превращении растворимой формы в корпускулярную. В результате антиген лучше захватывается и представляется иммунокомпетентным клеткам, т.е. превращается из тимусзависимого в тимуснезависимый антиген. Кроме того, адъюванты в месте введения вызывают воспалительную реакцию с образованием фиброзной капсулы, в результате чего антиген долгое время сохраняется (депонируется) в месте инъекции и действует длительное время (эффект ревакцинации). В связи с этим адъювантные вакцины еще называют депонированными. Кроме того, адъюванты непосредственно активируют пролиферацию клеток Т-, В-, А-систем иммунитета и в несколько раз усиливают синтез защитных белков организма. Обычно адъюванты усиливают иммуногенность антигенов в несколько раз, а некоторых антигенов в десятки раз.

*14.2.2.8. Общая характеристика вакцин, применяемых в практике*

В настоящее время в мире создано более 100 различных вакцин, с помощью которых медики могут контролировать более 40 различных инфекций.

Применение этих вакцинных препаратов позволило человечеству достичь невероятных успехов в борьбе с инфекционными заболеваниями. Эффективность вакцин сильно различается. Тем не менее независимо от этого их применение всегда обоснованно, о чем свидетельствует значительное снижение заболеваемости и смертности среди вакцинированных. Специалисты из США считают, что средняя продолжительность жизни за XX век выросла по сравнению с ожидаемой по крайней мере на 20 лет, и 80% этого увеличения относят на результат широкого применения вакцинных препаратов. Применение вакцин не только позволяет сохранить здоровье и даже жизнь миллионам людей, но и дает огромный экономический эффект. ВОЗ считает вакцинацию наиболее эффективным способом борьбы с инфекционной заболеваемостью.

Существуют общие требования ко всем вакцинным препаратам. Любая вакцина, рекомендуемая для применения, должна быть иммуногенна, безопасна, нереактогенна, не должна вызывать аллергических реакций, не должна обладать тератогенностью и онкогенностью. Штаммы микроорганизмов, из которых готовят вакцинный препарат, должны быть генетически стабильными. Вакцина должна иметь длительный срок хранения, производство ее должно быть технологичным, а способ применения — простым и доступным для массового применения.

#### *14.2.2.9. Календарь прививок. Показания и противопоказания к вакцинации*

В большинстве стран, в том числе и в России, действует календарь прививок, в котором регламентируется обоснованное проведение во всех возрастных группах вакцинации против определенных инфекционных болезней. В календаре указано, какими вакцинами и по какой временной схеме должен быть привит человек в детском возрасте и во взрослом периоде. Так, в детском возрасте (до 10 лет) каждый человек должен быть привит против туберкулеза, кори, полиомиелита, эпидемического паротита, краснухи, гепатита В, дифтерии, столбняка, коклюша. Кроме того, в календарь прививок внесена вакцинопрофилактика гриппа по эпидемиологическим показаниям.

Кроме того, показаниями к вакцинации являются появление или угроза распространения инфекционного заболевания, а также возникновение вспышек или эпидемий тех или иных инфекций.

Противопоказания определены для каждой отдельной вакцины и указаны в инструкции для ее применения. Общими противопоказаниями являются острые инфекционные или неинфекционные заболевания; аллергические состояния; заболевания центральной нервной системы; хронические заболевания паренхиматозных органов; тяжелые заболевания сердечно-сосудистой системы; выраженные иммунодефициты; злокачественные заболевания.

Поствакцинальные реакции в виде кратковременного повышения температуры тела, местные реакции (гиперемия, отек на месте введения препарата), если они не превышают границу указанных в инструкции по применению вакцины параметров, не являются противопоказаниями к прививкам.

### 14.2.3. Бактериофаги

Бактериофаги — один из видов ИБП, созданных на основе вирусов, поражающих бактерии. Их применяют в диагностике, профилактике и терапии многих бактериальных заболеваний (брюшной тиф, холера, дизентерия и др.). Бактериофаги получают путем культивирования пораженных бактериофагом бактерий на питательных средах с выделением из культуральной жидкости фильтрата, содежащего фаги. Активность препарата определяют путем титрования на чувствительных к нему культурах бактерий. Назначают эти препараты с профилактической и лечебной целью перорально или местно длительными курсами.

### 14.2.4. Пробиотики

Пробиотики — препараты, содержащие культуру непатогенных для человека и животных бактерий — представителей нормальной микрофлоры кишечника человека, предназначенные для ее коррекции при дисбактериозах. Пробиотики применяют как с профилактической, так и с лечебной целью при дисбактериозах различной этиологии (при соматических и инфекционных заболеваниях, вторичных иммунодефицитах, использовании антибиотиков широкого спектра действия и др.).

Препараты представляют собой лиофильно высушенные живые культуры соответствующих микроорганизмов с добавками стабилизатора и вкусовых веществ и выпускаются в виде порошков или таблеток. Дозируются пробиотики по числу живых бактериальных клеток в таблетке или 1 г.

Кроме того, в последнее время получили широкое распространение пробиотики в виде молочнокислых продуктов. Пробиотики назначают перорально длительными (1−6 мес) курсами по 2−3 раза в день, как правило, в сочетании с другими методами лечения.

### 14.2.5. ИБП на основе специфических антител

Антитела относятся к числу основных иммунореагентов большинства иммунных реакций, определяющих состояние иммунитета организма. Они крайне разнообразны по функциям и структуре. К ИБП на основе антител относятся иммунные сыворотки, иммуноглобулины, моноклональные антитела, иммунотоксины, иммуноадгезины, абзимы (антитела-ферменты).

*14.2.5.1. Иммунные сыворотки и иммуноглобулины*

Иммунные лечебные и профилактические сыворотки применяют уже более 100 лет. В настоящее время используют антитоксические (против различных бактериальных токсинов), антибактериальные (противотифозная, противодизентерийная, противочумная и др.), противовирусные (против бешенства, клещевого энцефалита и др.) иммунные сыворотки. Иммунные сыворотки получают путем гипериммунизации (многократной иммунизации) животных (лошади, ослы, кролики) специфическим антигеном с последующим выделением из крови иммунных сывороток. Такие препараты называются гетерогенными иммунными сыворотками, так как они содержат чужеродные для человека сывороточные белки. Для получения гомологичных сывороток используют кровь переболевших людей или специально иммунизированных доноров. Такие сыворотки предпочтительнее, так как дают гораздо меньше побочных реакций на их введение. Основным действующим началом в иммунных сыворотках являются специфические иммуноглобулины против того или иного антигена токсинов, бактерий вирусов. Поэтому их выделяют из иммунных сывороток, очищают и концентрируют различными физико-химическими методами. Иногда для повышения специфичности антител выделяют только их антигенсвязывающий участок (*Fab*-фрагмент). Такие препараты получили название доменных антител.

Иммунные сыворотки и препараты иммуноглобулинов применяют с лечебной и профилактической целью. Особенно эффективно их применение для лечения и профилактики токсинемических инфекций (столбняк, ботулизм, газовая гангрена, дифтерия). С лечебной целью эти препараты вводят как можно раньше внутримышечно или внутривенно в больших дозах.

Профилактические дозы сывороточных препаратов значительно меньше, препараты вводят внутримышечно людям, имевшим контакт с больным или источником инфекции, для создания пассивного иммунитета. После введения иммунных сывороток или иммуноглобулинов возможны осложнения в виде анафилактического шока и сывороточной болезни. Потому перед введением таких препаратов необходимо ставить аллергическую пробу на чувствительность к ним пациента, а вводить — по Безредке, т.е. дробно небольшими количествами. Иногда прибегают к активно-пассивной иммунизации, т.е. к одновременному введению вакцины и сыво-

ротки для формирования кратковременного пассивного иммунитета с заменой его через несколько недель активным, возникающим в ответ на введение вакцины. К такому методу иммунизации прибегают при профилактике столбняка у раненых, профилактике бешенства и в некоторых других случаях.

*14.2.5.2. Моноклональные антитела*

Как известно, антитела по своей структуре и функциям очень разнородны. Каждый В-лимфоцит синтезирует свой класс, подкласс, аллотип иммуноглобулинов. Поэтому в ответ на введение антигена в крови появляются поликлональные антитела, т.е. смесь иммуноглобулинов, синтезированных множеством клонов активированных В-лимфоцитов.

Для получения иммуноглобулинов, синтезированных только одним В-лимфоцитом или одним полученным от него клоном, т.е. моноклонального иммуноглобулина, необходимо иммунный В-лимфоцит размножить в искусственных условиях и добиться синтеза иммуноглобулина. Однако это невозможно, так как В-лимфоциты не размножаются *in vitro.* Исходя из этого немецкие ученые Келлер и Мильштейн разработали метод получения моноклональных антител с помощью гибридных клеток, образованных путем слияния иммунного В-лимфоцита с миеломной клеткой. Такие клетки получили название гибридом. Гибридомы способны быстро размножаться *in vitro* в культуре клеток и продуцировать при этом иммуноглобулин, характерный только для взятого В-лимфоцита.

Гибридомы, продуцирующие моноклональные антитела, размножают или в специальных аппаратах, или вводя их внутрибрюшинно мышам особой линии, выделяя их потом из асцитической жидкости.

С лечебной целью моноклональные антитела практически не используются из-за высокого риска введения в организм генетического материала миеломных клеток. Однако они широко применяются для создания диагностических препаратов и очистки антигенов.

*14.2.5.3. Иммуномодуляторы*

Иммуномодуляторами называют вещества, оказывающие влияние на иммунную систему. Их подразделяют на эндогенные и экзогенные.

К *экзогенным* иммуномодуляторам относится большая группа веществ различной природы и происхождения (растительные, бактериальные, искусственно синтезируемые), оказывающих активирующее или супрессивное действие на иммунную систему.

*Эндогенные* иммуномодуляторы представляют собой достаточно большую группу олигопептидов, синтезируемых самим организмом, его иммунокомпетентными и другими клетками и способных активировать иммунную систему путем усиления пролиферации и функции иммунокомпетентных клеток, т.е. обладающих иммуностимулирующим свойством. К ним относятся лимфокины, интеферONы, миелопептиды, хемокины, пептиды тимуса.

Иммуностимулирующим свойством обладают также экзогенные иммуномодуляторы, такие, как адъюванты, многие химические соединения, цитокины и интерфероны, лизаты бактерий, рибосомальные вакцины (риболизины), производные растений рода *Echinoceae*.

Иммуносупрессирующее действие оказывают все цитостатики, антагонисты пуринов и аминокислот; алкилирующие агенты (циклофосфамид), ингибирующие выработку антител; кортикостероиды, которые препятствуют презентации антигена, ингибируют первичный антительный ответ, уменьшают секрецию ИЛ-1 и количество циркулирующих Т-лимфоцитов, блокаторы действия ИЛ-2 (циклоспорин), действующие на Th1-лимфоциты, препятствуя выработке ими ИЛ-2, а также антилимфоцитарная сыворотка, рентгеновские лучи и γ-излучение.

Иммуномодуляторы широко применяют при лечении иммунодефицитов различной природы, онкологических заболеваний, иммунопатологических и аллергических болезней, профилактике и лечении инфекционных заболеваний, трансплантации органов и тканей. Для этого создан ряд препаратов, оказывающих иммуномодулирующее действие. К ним относятся препараты интерферона и его индукторов. Создан целый ряд препаратов на основе интерлейкинов, полученных в основном генно-инженерным путем. Из экзогенных иммуномодуляторов чаще всего используются препараты, полученные из микробных клеток, например препарат ИРС19, полученный из лизатов бактериальных культур пневмококка, стрептококка, клебсиелл, гемофильной палочки.

## Задания для самоподготовки (самоконтроля) (к главам 13, 14)

**А.** Отметьте реакции, которые используются для оценки иммунного статуса организма:

1. РСК.
2. Проточная цитометрия.
3. Реакция Кумбса.
4. Радиальная иммунодиффузия.
5. ИФА.

**Б.** Назовите реакцию, которая используется для определения наличия неполных антител:

1. Реакция кольцепреципитации.
2. Реакция Кумбса.
3. Радиальная иммунодиффузия.
4. Нейтрализации.

**В.** Отметьте препараты, которые создают в организме активный иммунитет:

1. Пробиотики.
2. Вакцины.
3. Иммуномодуляторы.
4. Анатоксины.
5. Моноклональные антитела.

# ОТВЕТЫ К ТЕСТАМ 1-го ТОМА

*Часть I*

**Глава 1**. **А** (1). **Б** (3). **В** (4).

**Глава 2**. **А** (3). **Б** (1, 2). **В** (2, 4). **Г** (1, 3, 4). **Д** (1, 2). **Е** (1, 4). **Ж** (1, 2). **З** (1, 2, 3). **И** (1, 3, 4). **К** (2). **Л** (2, 3, 4).

**Глава 3**. **А** (2). **Б** (3). **В** (4). **Г** (2). **Д** (3). Е (1, 2). **Ж**. Более эффективной средой является среда № 1. Продолжительность лаг-фазы зависит от того, насколько быстро происходит адаптация бактериальной культуры к новым условиям. Чем эффективнее и питательней среда для конкретного микроба, тем период адаптации короче. **З**. Бактериальная культура А — факультативный анаэроб. Бактериальная культура Б — микроаэрофил. Бактериальная культура В — строгий аэроб. Бактериальная культура Г — строгий анаэроб.

**Глава 4**. **А** (1, 2, 4). **Б** (1, 2, 4, 5). **В** — синбиотики. **Г** (1, 3, 4). **Д** (2, 3, 4). **Е** (4). Ж (1, 2, 3). **З** (1). **И** (1). **К** (1). **Л** (1). **М** (1).

**Главы 5, 6**. **А** (3). **Б** (1, 2, 3). **В** (1, 2, 3). **Г** (1, 2, 3). **Д**. Идентичность выделенных культур можно установить, выделив ДНК из обоих штаммов и произведя рестрикционный анализ ДНК. Сопоставляя карты рестрикции ДНК, выделенные из различных штаммов, можно определить их генетическое родство. Также можно определить плазмидный профиль выделенных культур. Плазмидный профиль позволяет произвести внутривидовую идентификацию бактерий. Для этого из бактериальной клетки выделяют плазмидную ДНК, которую разделяют электрофорезом в агарозном геле, для определения количества и размеров плазмид. Если плазмидные профили обоих штаммов будут одинаковы, то можно сделать заключение об их идентичности.

**Глава 7**. **А** (1, 3, 4). **Б** (2, 4). **В** (2, 3, 4). **Г** (1, 2, 3). **Д** (1,2,3,4,5). **Е**. Для борьбы с инактивирующим действием β-лактамаз используют вещества-ингибиторы (например, клавулановую кислоту, сульбактам, тазобактам). Они содержат β-лактамное кольцо и способны связываться с β-лактамазами, предотвращая их разрушительное действие на β-лактамный антибиотик.

**Глава 8**. **А** (2). **Б** (1, 2, 4). **В** (1, 2). **Г** (1, 2, 3). **Д** (2, 4). **Е**. Вторичная инфекция; **Ж**. Бактерии из крови можно выделить при бактериемии, сепсисе, септикопиемии.

*Часть II*

**Глава 9**. **А** (1, 2, 4, 5). **Б** (1, 3). **В** (3, 4). **Г** (1, 2, 4, 5, 6).

**Глава 10**. **А** (2, 3, 4). **Б** (1, 2, 3). **В** (2, 3, 4). **Г** (1, 2, 3). **Д** (1, 2, 3, 4). **Е** (1, 2, 3, 4). **Ж** (1, 3, 4). **З** (1). **И** (2). **К**. Суперантигены микробов взаимодействуют с рецептором 2 класса главного комплекса гистосовместимости и антигенраспознающим Т-клеточным рецептором вне антигенсвязывающей щели. В результате такого взаимодействия специфический иммунный ответ блокируется, при этом происходит ложная реакция распознавания антигена; вызываются поликлональная активация и антигеннеспецифическая пролиферация лимфоцитов и гиперпродукция цитокинов, способствующая гибели Т-лимфоцитов.

**Глава 11**. **А** (2). **Б** (3). **В** (1). **Г** (2, 3). **Д** (3). **Е** (1, 3). **Ж** (2, 3). **З** (2). **И**. Контактная аллергия относится к ГЗТ (IV тип). Аллергеном могут служить как большие молекулы, так и гаптены. Проникнув через кожу, аллерген прикрепляется к нормальной белковой молекуле, модифицируя ее. Клетки Лангерганса захватывают ее и представляют Т-клеткам в регионарных лимфатических образованиях. При повторном контакте с аллергеном сенсибилизированные Т-лимфоциты мигрируют к кожным участкам, вызывая реакцию, сопровождающуюся моноцитарной инфильтрацией, отеком, появлением везикул на коже. **К**. При родах эритроциты плода попадают в кровяное русло матери. К ним вырабатываются антирезус-IgG. При повторных беременностях резус-положительным плодом у резус-отрицательных женщин антирезус-IgG проходит через плаценту и, оказывая цитотоксическое действие на эритроциты плода, разрушает их. Это вызывает развитие гемолитической болезни новорожденных, поэтому для предотвращения образования антирезус-антител вводится антирезус-сыворотка. **Л**. Наибольшей толерантностью обладают наименее чужеродные по отношению к организму антигены, обладающие низкой молекулярной массой и гомогенностью. Толерантность легко формируется к тимуснезависимым антигенам, например бактериальным полисахаридам.

**Глава 12**. **А** (3). **Б** (1, 2, 3). **В** (2, 4, 5). **Г** (1,4). **Д**. У пациента возможно наличие Т-клеточного иммунодефицита.

**Главы 13, 14**. **А** (2, 4). **Б** (2). **В** (2, 4).

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ